

В. И. ВЛОДАВЕЦ

ВУЛКАНЫ ЗЕМЛИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Серия «Настоящее и будущее Земли и человечества»

В. И. ВЛОДАВЕЦ

ВУЛКАНЫ ЗЕМЛИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1973

В книге известного ученого, основоположника советской вулканологии профессора В. И. Влодавца рассказывается о вулканической деятельности Земли. Автор раскрывает не только причины, механизм и характер извержений, но и показывает возможность принятия своевременных мер защиты от этого грозного явления природы.

Книга содержит большой познавательный материал о нашей планете, представляющий значительный интерес как для специалистов-вулканологов, геологов, петрографов, так и для широкого круга читателей.

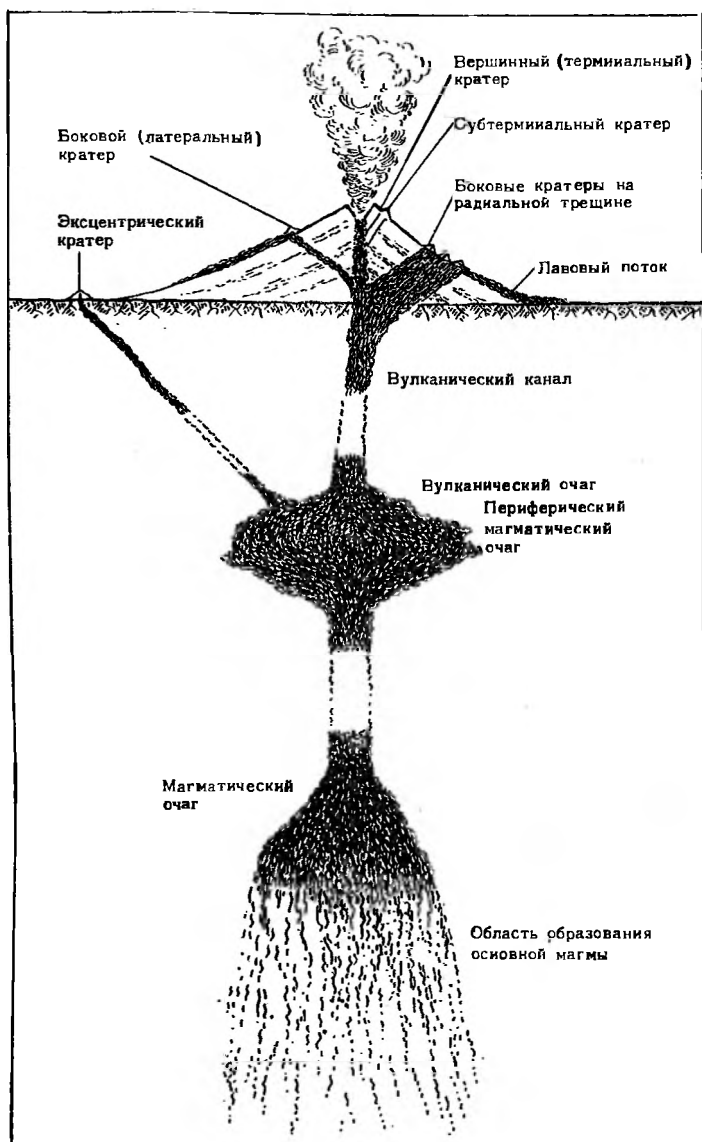
Вулканическая деятельность, относящаяся к ряду наиболее грозных явлений природы, часто приносит огромные бедствия людям и народному хозяйству. Поэтому необходимо иметь в виду, что хотя не все действующие вулканы вызывают несчастья, тем не менее каждый из них может быть в той или иной степени источником событий, могущих повлечь за собой трагические последствия. Извержения вулканов бывают различной силы, однако к катастрофическим относятся только те, которые сопровождаются гибелью людей и материальных ценностей.

Предотвратить извержения пока еще невозможно (хотя и существуют некоторые теоретические соображения и практические предложения), но в той или иной мере защититься от их пагубных воздействий можно.

В ряде наук, в частности в вулканологии, должны разрабатываться вопросы предвидения катастрофических явлений, чтобы можно было заранее предупредить о них, а не заниматься только анализом уже совершившихся событий, приведших или не приведших к тем или иным бедствиям. Поэтому выработка мер, основанных на научных данных и мировом опыте, по созданию условий безопасности и охране людей от гибели, а также от разрушения и уничтожения материальных ценностей и проведение их в жизнь должны осуществляться до грозных событий, а не после них, как это, к сожалению, часто наблюдается.

Цель этой работы — сообщить сведения не только о вулканах и их подчас грозной деятельности — катастрофических извержениях, но и познакомить с некоторыми мероприятиями — мерами защиты, своевременное принятие которых сможет устранить гибель людей и уменьшить ущерб народному хозяйству.

Во всяком случае, стремление автора — не напугать людей, а дать несколько более подробное представление о характере вулканической деятельности. Ведь известна истина — чем лучше знаем врага, тем легче его победить. Ее можно применить и в отношении катастрофических извержений — чем лучше будем их знать, тем легче избежать их губительных воздействий.



Схематический разрез вулкана и его корней

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ

Был 79 год нашей эры...

Побережье Неаполитанского залива, окаймленного на северо-западе островами Искья и Прочида и холмами Флегрейских (Пылающих) полей, горой Соммой к северо-востоку от залива и горами Соррентского полуострова и островом Капри на юго-востоке, с древних времен было заманчивым местом для поселений.

Благодатный климат, плодородные земли, лазурное море с его дарами, торговые морские пути и дороги в Рим, на восток и юг Апеннинского полуострова — все это привлекало сюда людей. Они селились на побережье, создавая города и поселки. Так возникли Неаполь, Геркуланум, Помпеи, Стабия и др.

Строители и архитекторы возводили дома, дворцы, храмы, театры. Художники и скульпторы украшали стены зданий дивными фресками, а площади и дворцы — статуями. Резчики вырезали прелестные камеи, и это искусство сохранилось здесь до наших дней. Врачи лечили зубы при помощи инструментов, мало отличающихся от современных, а ткачи ткали разнообразные ткани и нередко такие тонкие, что они были прозрачны, подобно струям воды в чистом горном ручье. Садовники разводили сады и выращивали виноград, а земледельцы обрабатывали землю и плоды своего труда вывозили для продажи в города и поселки.

Жители Неаполитанского побережья еще помнили, что на вершине горы Соммы, в заросшей лесом, открытой к югу чапеобразной впадине, примерно 150 лет тому назад скрывался вождь восставших рабов Спартак, но они забыли, что эта гора является вулканом.

Люди не ожидали каких-либо особых неприятностей со стороны Соммы несмотря на то, что 16 лет назад, а именно, в 63 г., произошло сильное землетрясение, принесшее большие разрушения. По представлениям жи-

телей, это змей, живущий в глубинах Земли, проснулся и стал извиваться, вызвав колебание Земли. Население, однако, принялось энергично восстанавливать разрушенное, и вскоре города залечили свои раны.

Наступило 24 августа 79 г. — день, ознаменовавшийся землетрясениями. Из впадины на вершине Соммы, словно высокий ствол с расходящимися в стороны ветвями, поднялось белое с грязно-темными пятнами облако, затем ставшее совсем черным. Водяные пары и другие газы с огромной силой выбрасывали в высь пыль, песок, мелкие и более крупные обломки камней, которые разбрасывались и рассеивались в стороны, но главная масса более мелких частиц передвигалась в южном направлении. Непрерывные выбросы их сопровождались громом, молниями, а затем и сильным ливнем, преимущественно над западным склоном горы. Черное облако разрасталось. «Дома, — по свидетельству Плиния Младшего, оставившего первый письменный документ очевидца о вулканическом извержении, — на мысе Мизено (расположенном у входа в Неаполитанский залив, где жил в то время Плиний Младший — В. В.), качались от частых продолжительных толчков: казалось, что они сдвинулись со своих мест и ходуном ходят взад и вперед. Под открытым небом было страшно от падавших кусков пемзы, хотя легких и пористых.

Был уже первый час (по современному исчислению 5 час. утра. — В. В.)... Здания вокруг тряслись: мы были на открытом месте, но в темноте, и было очень страшно, что они рухнут. Тогда, наконец, решились мы выйти из города; за нами шла потрясенная толпа... Огромное количество людей теснило нас и толкало вперед. Выйдя за город, мы остановились. Тут случилось с нами много диковинного и много ужасного. Повозки, которые мы распорядились отправить вперед, находясь на совершенно ровном месте, кидало из стороны в сторону, хотя их и подпирала камнями. Мы видели, как море втягивается в себя же; земля, сотрясаясь, как бы отталкивала его от себя. Берег, несомненно, выдвигался вперед; много морских животных застряло на сухом песке. С другой стороны, в черной страшной грозовой туче вспыхивали и перебегали огненные зигзаги, и она раскалывалась длинными полосами пламени, похожими на молнии, но большими...



Фреска в одном из зданий Помпей

Немного спустя, туча стала спускаться на землю, покрыла море... Стал падать пепел, пока еще редкий; оглянувшись, я увидел, как на нас надвигается густой мрак, который, подобно потоку, разливался вслед за нами по земле. «Свернем,— сказал я,— пока видно, чтобы не растянуться по дороге и чтобы нас не растоптали в потемках наши спутники». Едва мы приняли это решение, как наступила темнота, не такая, как в безлунную или облачную ночь, а какая бывает в закрытом помещении, когда потушен огонь. Слышны были женские вопли, детский писк и крики мужчин: одни звали родителей, другие детей, третьи жеп или мужей, силясь распознать их по голосам... некоторые в страхе перед смертью молились о смерти; многие воздевали руки к богам, но большинство утверждало, что богов нигде больше нет и что для мира настала последняя вечная ночь. Не было недостатка в людях, которые увеличивали подлинную опасность страшными выдумками... Пепел посыпался частым тяжелым дождем. Мы все время вставали и стряхивали его; иначе нас закрыло бы им и раздавило под его тяжестью... Мрак, наконец, стал рассеиваться... Гла-

зам еще трепетавших людей все представилось изменившимся: все было засыпано, словно снегом, глубоким пеплом... Землетрясение продолжалось...»¹

А в то же время на Помпей, расположенные в 10 км к юго-востоку от вершины Соммы, сыпался и сыпался вулканический пепел с мелкими камешками — лапиллями, насыщенными паром и ядовитыми газами. Жители города в ужасе не знали, что делать — сидеть ли дома или бежать. Большинство все же бросилось бежать — одни в сторону моря, пытаясь на лодках и судах спастись от этого пеплопада, другие — по дорогам на юг и восток.

Люди бежали, задыхались, падали и умирали в страшных конвульсиях, о чем свидетельствуют гипсовые слепки людей и собак.

Жители, оставшиеся в городе, погибли, засыпанные лапиллями и пеплом. Улицы Помпей покрыла 7—8-метровая толща камней, песка и пыли, огромные массы которых вновь образовали во впадине Соммы конус, называемый Везувием. (Во время этого извержения под грязевыми потоками и отложениями раскаленной тучи исчез город Геркуланум и погибла залитая лавой Стабия.)

Люди вскоре забыли о существовании Помпей, и лишь через полторы тысячи лет археологические находки помогли ее обнаружить и воскресить трагические события. С 1748 г., когда начались систематические раскопки, и по настоящее время откопано более трех четвертей города. Можно предположить, что из 25000 его жителей погибло около 1500—2000 человек, но более точная цифра будет определена только после окончания работ.

Знакомясь ныне с улицами и площадями Помпей, выложенными каменными плитами, невольно удивляешься тому, как люди, возводившие здания около 2000 лет назад, прекрасно учли условия расположения города. Например, на случай землетрясения или других бедствий в театре было сделано 107 выходов, благодаря чему 20 000 зрителей могли покинуть здание за 2,5 мин. Строители предусмотрели даже такую деталь, как установка посередине узких улиц каменных тумбочек на одном уровне с высотой тротуаров, для того чтобы во время силь-

¹ Письма Плиния Младшего. М., Изд-во АН СССР, 1950.



Улица в Помпеях

ного дождя пешеходы, переходя улицу, не замочили ноги, причем эти тумбочки были расположены на таком расстоянии друг от друга, что не мешали движению колесниц.

1006 год

В конце первого тысячелетия нашей эры на острове Ява процветало хинди-яванское государство Матаран. На его территории разместилось несколько городов с многочисленными храмами, из которых Прамбанан находился у самого подножия вулкана Мерапи. Его великолепные храмы строились в течение IX и X столетий. Некоторые из них так и не были завершены — разразилась катастрофа, приведшая не только к разрушению городов, но и к упадку всего государства.

Начавшиеся подземные толчки были настолько сильными, что на конусе вулкана образовалась косонаправленная трещина, нарушившая сцепление пород, слагающих конус. Под влиянием тяжести пород его верхняя часть начала сползать в долину. Вслед за обвалами произошел колоссальной силы взрыв, который завершил разрушения. Большая площадь государства покрылась крупными и мелкими обломками пород.

1631 год

Вечером 15 декабря в районе Везувия начались землетрясения, сначала слабые, а затем все усиливавшиеся. На рассвете следующего дня раздался сильный грохот, и на южном склоне вулкана появилась трещина, из которой с огромной силой выбрасывались пар, пепел, лапилли и крупные глыбы. Они падали на окружающие поселения, вызывая пожары. Однако наибольшие бедствия принес огромный лавовый поток, который на третьи сутки извержения (18 декабря) вырвался из кратера и, растекаясь отдельными огненными реками, разрушил полностью или частично 9 поселений, при этом погибло около 3000 человек.

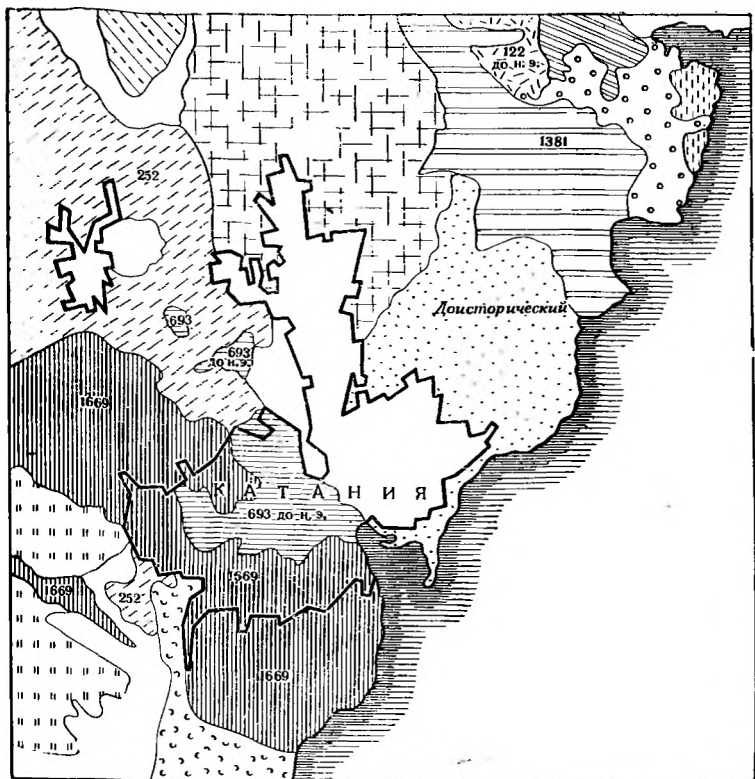
1669 год

В этот год произвел свою «дьявольскую» работу другой вулкан — Этна, расположенный на острове Сицилия.

В первых числах марта над кратером Этны стали подниматься черные облака и по вечерам можно было видеть огонь. Начались сильные землетрясения. Многие дома в деревнях, расположенных на южной стороне вулкана, разрушились. 11 марта из появившейся на южном склоне вулкана в меридиональном направлении трещины длиной 8 км и шириной до 2 м потекла лава. Вскоре на трещине образовались один за другим 20 кратеров. В этот день лавовый поток шириной до 4300 м разрушил деревню, а на следующий день полностью — городок Мальпассо. В последующие дни поток, разделившись на рукава, продолжал течь, разрушая лежащие на пути поселения, а 14 и 15 марта произошло извержение раскаленного пепла, сжигавшего все, что только могло гореть.

26 марта в 11 часов дня произошло сильное землетрясение и вслед за ним поднялась огромная туча пепла. Вершина вулкана Этна обрушилась. После исчезновения ее начался последний акт драмы — лавовый поток приблизился к городу Катанья, и 15 апреля лава достигла бастионов северо-западной части города. Жители Катаньи, боясь, что лава ворвется в город, замуровали ворота.

Тем временем новые порции лавы нагромождались у бастионов, как бы отыскивая слабое место в их стенах.



Схематическая карта лавовых потоков Этны вблизи Катании.
Цифры — годы излияния лавовых потоков

И 30 апреля в 10 часов, проломив каменную стену и образовав 50-метровую брешь, лава с большим шумом ворвалась в город. Пять дней (с 1 по 5 мая) население Катании вело непрерывную борьбу с дальнейшим распространением лавы. На улицах строили баррикады, замуровывали входы в улицы.

Пытаясь преградить путь лаве, один из жителей города, Дон Диего Паппалардо, вместе с рабочими, которых, по одним данным было 50, а по другим — 100, одевшись в смоченные водой шкуры и, когда лава уже двигалась по центру города, сменяя друг друга через короткие промежутки времени, стали взламывать при помощи ло-

мов, молотков, крючьев и копий борт лавового потока. После тяжелой и напряженной работы им удалось проломить борт, и огненно-жидкая лава вырвалась с такой силой, что, если бы смельчаки своевременно не отскочили в сторону, сгорели бы заживо.

Оправившись от первого испуга, они принялись расширять в борту лавового потока отверстие, из которого лава потекла в сторону деревни Патерно, продвинувшись к ней почти на 300 м. Жители этой деревни, увидев опасность для своих жилищ, подняли тревогу. По звону набата вышло 500 человек, которые с барабанным боем и трубами двинулись на группу Паппалардо и прогнали их.

Извержение Этны, сопровождавшееся землетрясением, продолжалось почти четыре месяца. В результате пострадали 18 поселений и большой город Катанья.

1783 год

В этом году в Исландии произошло извержение вулкана Лаки, которое в историческое время по объему излившейся лавы не имеет себе равных. В центральной части южной половины острова образовалась трещина длиной около 25 км. Извержение началось утром 8 июня и продолжалось до февраля следующего года. Из трещины, вдоль которой образовался ряд кратеров, полилась лава. Кроме того, взрывами был выброшен вулканический пепел, отложившийся на большей части страны. Этот пеплопад и газы причинили колоссальный ущерб. Пеплом были засыпаны частично или полностью пастбища. Животные заболевали, так как с травой попадала масса пепла (представляющего собой, как известно, смесь мелких обломков стекла и в меньшей степени — минералов), и затем погибали от ранений внутренних органов. Последствия извержения для Исландии были ужасными. Погибло около 10 000 голов крупного рогатого скота (50%), 27 000 лошадей (76%) и около 180 000 овец (79%). Вскоре стали умирать от голода и болезней люди. В течение одного года из 48 884 жителей острова погибло 10 521 человек, т. е. приблизительно $\frac{1}{5}$ всего населения.

1792 год

На вулкане Унзен, расположенном в Японии на острове Кюсю, события нарастали в следующем порядке. Землетрясения и дрожания, начавшиеся 13 ноября 1791 г., сменились 10 февраля 1792 г. извержениями с выбросом многочисленных обломков пород с вершины центрального купола (Хугендаке). 1 марта из отверстия на склоне купола стала изливаться лава. 5 марта произошел оползень, а затем началась серия землетрясений. Только 21 апреля их было зафиксировано около 300. От некоторых из них разрушились дома в ближайшем городе Симабара. Завершились эти события обрушением восточного купола (Майеяма). Образовавшаяся каменная лавина покатила к подножию горы и погребла 10 000 человек. Кроме того, вызванное этим обрушением цунами на берегу залива к востоку и югу от Симабара поглотило еще 4300 человек.

1794 год

В этом году произошло извержение Везувия, по силе аналогичное извержениям в 79 и 1631 гг. Началось оно землетрясением 12 июня со страшным грохотом.

Известный геолог Леопольд фон Бух так описал его: «Через три дня, 15 июня, в 11 час. ночи снова повторилось землетрясение. Оно выражалось уже не волнообразным движением, а страшным подземным ударом. На зданиях появились трещины, окна звенели и разбивались, мебель падала. Вдруг на небе появилось зарево красного пламени и светящиеся пары.

У подножия конуса Везувия появилась трещина, и с крыш домов можно было наблюдать, как оттуда вылетала лава, описывая в воздухе параболические кривые линии.

Раздался глухой, сильный шум, подобный реву водопада, устремляющегося в глубокую долину. Гора беспрестанно колебалась, а четверть часа спустя землетрясение охватило и город (Неаполь). С такой силой лава не извергалась еще никогда... Новые отверстия показали в вулкане, и с ужасной силой и ревом вырывались новые потоки лавы. Дым, пламя и пары поднялись выше облаков и распространились во все стороны в виде неизмеримой, огромной лавины... Широкой рекой со страшной быстротой понеслась лава по склонам горы. Вулкан из-

вергал все новые и новые массы ее; они падали в поток и сообщали ему новую силу. Одни из жителей Резины, Портичи, Торре-дель-Греко с ужасом наблюдали за каждым движением огненной реки, угрожавшей то тому, то другому месту; другие бросились к алтарям и неподвижно молили о спасении. Вдруг лава направилась на Резину и Портичи. В Торре-дель-Греко все население бросилось в храмы благодарить бога за спасение; в порыве радости они и не думали о той гибели, которая неизбежна была для их соседей. Но на своем пути лава встретила глубокий ров, направление ее изменилось, и она понеслась на несчастный Торре-дель-Греко, который считал себя спасенным. С новой яростью огненный поток устремился по крутым склонам и, не делясь на рукава, в виде реки шириной в 600 м полился в цветущий город; все восемнадцатитысячное население бросилось спасаться к морю. С берега можно было наблюдать, как над крышами залитых лавой домов вздымались столбы черного дыма и огромные огненные языки в виде молнии. Дворцы и церкви разрушались с шумом, и слышался страшный гром.

Лава вырвалась из вулкана в 11 час. ночи, а в 5 час. утра городка Торре-дель-Греко не стало. В течение 6 час. пылающая масса пробежала четыре итальянских мили с неведомой в истории Везувия быстротой. Даже море не остановило ее; нижние части лавовых потоков застывали, а верхние текли по ним. Вода кипела на большом протяжении, и сварившиеся рыбы в бесчисленном количестве плавали на ее поверхности».

1815 год

Произошло самое грозное, самое опустошительное, самое страшное по силе взрыва за последние тысячелетия на Земле извержение вулкана Тамбора на острове Сумбава в Индонезии. Об извержениях его до этого года ничего не было известно.

Первые струи пара вблизи вершины были замечены в 1812 г. Впоследствии они становились плотнее и темнее, усиливался грохот, а 5 апреля 1815 г. произошел сильный взрыв, который был слышен на расстоянии до 1800 км. Максимальной силы извержение отмечалось с

10 по 12 апреля. Из кратера выделялись огромные клубы газов, насыщенных пеплом. Тучи пепла плотно закрыли небесный свод. По всей местности на протяжении 500 км до острова Мадура в течение трех дней стояла полная темнота. От вершины Тамбора на расстоянии до 40 км летели обломки горных пород диаметром до 15 см.

10 апреля в 12 час. дня в заливе Бима на спокойном море появилась огромная волна — цунами, продолжавшееся всего 3 мин. Но за это время волны успели разрушить здания, вырвать деревья, выбросить далеко на остров большие корабли.

Вся верхняя часть двухвершинного вулкана Тамбора исчезла, первоначальная высота его более 4000 м понизилась до 2851 м. Образовался огромный кратер диаметром $6 \times 6,5$ км и глубиной 600—700 м. Было выброшено очень большое количество обломков вулканических пород. Подсчеты различных авторов дают цифры от 30 до 300 км³. Наиболее вероятной все-таки следует считать величину в пределах 50—80 км³.

Масса пепла и обломков покрыла значительным слоем большую часть островов Сумбава, Ломбок и др. Цветущие сады и поля стали мрачной безжизненной пустыней. Так, на Ломбоке слой пепла достигал 60 см. В результате погибло 44 000 человек. На Сумбаве от голода и болезней умерло 38 000 и 10 000 человек во время самого извержения. Общее число погибших на этих островах — 92 000 человек. По другим подсчетам — 56 000 или 57 925 человек.

1822 год

Вулкан Галунггунг на Яве с озером в кратере возвышается на 2168 м над окружающей равниной с богатейшими рисовыми полями и множеством маленьких деревень.

В очень жаркий день 8 октября около 13 час. раздался сильный и продолжительный гул. Земля задрожала. Все жители, выбежав из домов, увидели черные клубы газов, вылетающих из кратера. Очень скоро эти черные вулканические облака покрыли все небо и стало темно, темнее, чем ночью. Население в панике бросилось бежать. А в это время стремительно неслись с вершины вулкана потоки грязи, состоящей из песка, камней и очень

горячей воды. Настигнутые ими люди (около 2000 человек), а также животные погибли за несколько секунд. Погибли деревни, леса и поля.

Через три часа сила извержения стала явно уменьшаться, и к 17 час. оно уже кончилось. Грязевые потоки покрыли местность, расположенную к юго-востоку от вулкана, слоем грязи толщиной до 3—4 м.

12 октября в 19 час. произошло землетрясение и вслед за ним из кратера Галунггунга с ужасным ревом и грохотом стали вновь вылетать кипящая вода и грязь. Это извержение произвело еще большие опустошения. Все, что уцелело после первого извержения, было уничтожено мощными грязевыми потоками на протяжении 24 км. Жители деревень взбирались на холмы высотой 6—10 м, но и это не спасло их. В ночь с 12 на 13 октября погибло около 2000 человек. В результате двух извержений погибло 4011 человек, разрушено 114 деревень и уничтожено 1 668 000 кофейных деревьев.

1883 год

Винновником катастрофы стал вулкан Кракатау, расположенный в Зондском проливе между островами Суматра и Ява. До извержения в этом году он представлял собой остров размерами 9×5 км. К северо-западу от него находился остров Ферлатен (Пустынный), а к северо-востоку — остров Ланг (Длинный), которые вместе с Кракатау являлись остатками одного, ранее существовавшего вулкана высотой около 2000 м. Доисторические извержения разрушили этот единый вулкан, и перед извержением в 1883 г. остров Кракатау состоял из трех соединявшихся конусов Пербуатана, Данана и Раката. Самый южный конус Раката имел высоту около 800 м, средний Данан — около 450 м и северный Пербуатан — около 120 м. Предыдущее извержение произошло в 1680—1684 гг., после чего вулкан находился в покое 200 лет.

Извержение Кракатау в 1883 г. началось 20 мая достаточно сильными взрывами из Пербуатана, которые были слышны более чем за 200 км. Над островом на высоту до 11 км поднялось облако газа и пепла. 27 мая взрывы происходили каждые 5—10 мин., выбрасывая пары, газ и мелкие обломки на высоту 2—3 км. Однако



Кратер Тамбора (фото М. Матахелужуала)

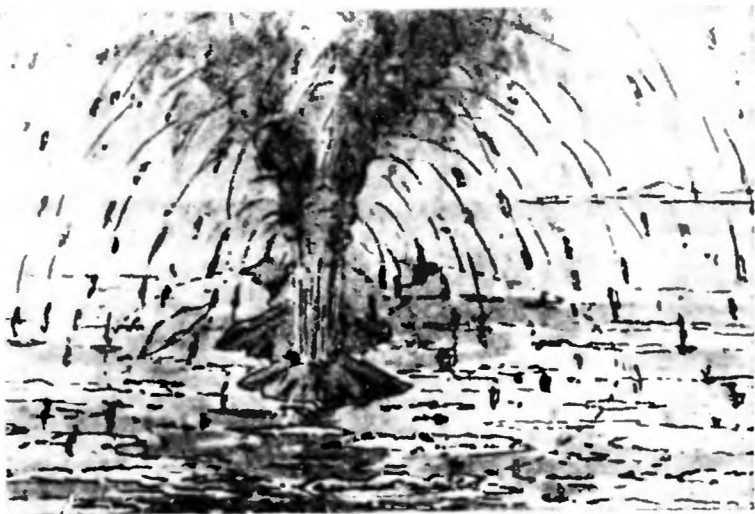
мощность образовавшихся отложений обломочного материала была незначительной — не больше одного метра, и самые крупные обломки не превышали 25 см в поперечнике.

После этих взрывов деятельность вулкана затихла, но 19 июня вновь был замечен столб газов над Пербуатаном, а 24 июня появился второй столб газов из нового жерла в северной части подножия Данана.

Что происходило до 11 августа неизвестно, но в этот день на острове Кракатау было обнаружено три больших кратера и множество маленьких, также извергавших газы, пар и пепел.

26 августа в 13 час. жители острова Явы, находящегося на расстоянии 160 км от Кракатау, слышали шум, похожий на гром. В 14 час. над Кракатау поднялась черная туча высотой около 27 км. В 14 час. 30 мин. были слышны частые взрывы, и шум все время усиливался. В 17 час. произошло первое цунами, которое, вероятно, было вызвано обрушением кратера. До полудня 27 августа возникало еще несколько цунами, которые объяснялись, видимо, дальнейшими обрушениями северной части Кракатау.

Взрывы продолжались всю ночь, но самые сильные из них произошли 27 августа в 10 час. 2 мин. Газы, пары, обломки, песок и пыль поднялись на высоту 70—80 км



Извержение Краиатау (из книги Р. Беммелена)

и рассеялись на площади свыше 827 000 км², а звук взрывов был слышен в Сингапуре и в Австралии.

Спустя полчаса цунами высотой 20, а местами до 35 м обрушилось на берега ближайших островов, в том числе на Суматру и Яву. В результате погибло 36 417 человек, были уничтожены здания, полотно железной дороги, посевы, сады, леса. В 10 час. 54 мин. произошел второй гигантский взрыв, по-видимому, такой же силы, как и предыдущий, но он не сопровождался цунами. Следующий взрыв с малым цунами отмечался в 16 час. 35 мин.

В течение всей ночи с 27 по 28 августа продолжались взрывы, однако сила их постепенно ослабевала. Небольшие взрывы происходили еще в отдельные дни (17 и 26 сентября, 10 октября), и лишь 20 февраля 1884 г. было отмечено самое последнее извержение, принесшее так много бедствий.

За время извержений было выброшено не менее 18 км³ горных пород, из них две трети упало на площади радиусом 15 км от места взрывов. Море, в частности, к северу от Кракатау, обмелело и сделалось несудоходным

для больших кораблей. Около 90% всего изверженного материала, т. е. около 16 км³, приходится на два самых сильных взрыва.

В результате этих взрывов сохранилась только южная половина конуса Раката, а на месте остальной части острова образовалась в океане впадина диаметром около 7 км, состоящая из двух впадин. Одна — между островами Ферлатен и Ланг глубиной в среднем 70 м (в двух местах она достигала почти 120 м). Вторая впадина, большая по размеру, находилась к югу от предыдущей и имела более ровное дно, максимальная глубина которого была 279 м. Однако существует мнение голландского вулканолога Б. Эшера, что в момент сильных взрывов образовалась воронкообразная впадина глубиной около 3 км, которая затем благодаря происшедшим оползням со стенок воронки уменьшилась до вышеупомянутой цифры, т. е. до 279 м.

Цунами, вызванные этим катастрофическим извержением Кракатау в 1883 г., наблюдались не только в Зондском проливе. Со скоростью 566 км в час они прошли по всему Индийскому океану — у Цейлона, в порту Елизаветы на юго-восточном берегу Африки, у Адена при входе в Красное море. В Тихом океане были зафиксированы вплоть до западного берега Америки, в Атлантическом океане — у берегов Франции и около Панамского перешейка.

1902 год

В северной части небольшого острова Мартиника поднимается на высоту 1397 м вулкан Пеле, или, как часто его называют, Мон-Пеле. На вершине вулкана в то время находилось два кратерных озера. Гребень, окружавший южное озеро, имел выемку по направлению к городу Сен-Пьер, расположенному в 6 км к югу от вершины, на берегу моря.

До мая 1902 г. вулкан Пеле не вызывал опасений у местного населения, так как последнее его извержение, происшедшее в 1851 г., было слабым. Население больше боялось землетрясений и ураганов, которые не раз причиняли бедствия острову.

Но в конце апреля — начале мая 1902 г. люди услышали гул и ощутили подземные толчки. Побывавшие на

вершине вулкана обнаружили, что в кратерах кипит вода, выделяя много пара. Затем гул и толчки стали все усиливаться. Время от времени вулкан выбрасывал тучи пепла, а 5 мая горячий грязевой поток спустился по руслу речки Белой и затопил сахарный завод, находившийся у ее устья на берегу моря.

Вот как рассказывал об этом очевидец — хозяин завода: «Ночью с горы спустилась черная грязь и перелилась через края защитительных сооружений, устроенных для защиты от наводнения речки Белой. Движение этой грязи остановилось в 4 часа и к 9 часам гора успокоилась. Более 500 человек собралось посмотреть на это явление, начавшее беспокоить и меня и всех присутствующих...

Я решил немедленно увести свою семью и служащих на фабрике. В полдень я еще не мог уехать. Я решил двинуться в путь в 2 часа и велел приготовить у фабричной пристани паровую яхту. В 10 минут первого слышу крики. Бьют тревогу. Люди бегут мимо моего дома, расположенного выше завода, и в ужасе кричат: «Гора идет!» И я слышу шум, который нельзя ни с чем сравнить, шум страшный, ну, просто дьявол на земле... и я выхожу, смотрю на гору... Над белыми облачками пара с горы спускается с треском черная лавина более 10 м высотой и в 150 м шириной. Выступив из ложа речки Белой, она катилась на фабрику, как армия гигантских черных баранов. Я остолбенел на месте. Я не мог пошевелиться. Вся энергия жизни сосредоточилась в глазах. Мой несчастный сын и его жена бегут к берегу. Вот они исчезают за фабрикой. Вот приходит и проходит в 10 м от меня раскаленная туча... Я чувствую ее смертельный ветер... эта грязь... треск. Все изломано, покрыто, потоплено... Мой сын, его жена, 30 человек, большое здание — все унесено лавиной. Они надвигаются бешеным натиском, эти черные волны, они надвигаются, как гром, и перед ними отступает море. Плеск воды, крики. Береговая сторожка отлетает на 150 м в сторону и убивает около меня моего управляющего. Я иду на берег. Это опустошение, которому нет имени. Там, где минуту раньше стояла благоустроенная фабрика, плод целой жизни, трудов и усилий, теперь только грязь, черный саван моего сына, моей невестки, моих людей».



Цунами в результате разрыва Кракату (из книги Р. Беммелена)

Но это был только пролог драмы, скорее даже не драмы, а трагедии, которая произошла 8 мая. В этот день вулкан с утра сильно выделял пары, газы и вулканическую пыль, которая медленно падала на склоны вулкана, город и гавань. Постепенно количество ее увеличилось до такой степени, что в городе стало темно и пришлось в домах зажигать лампы. Одновременно слышался гул и происходили слабые сотрясения почвы. Сообщения об этих событиях были последними, переданными по телефону из Сен-Пьера в соседний городок Фор-де-Франс. Телефонист тотчас после упомянутого сообщения услышал бормотание задыхающегося человека, потом какой-то непонятный шум и как будто удар в ухо, затем все стихло.

Эта катастрофа произошла в 7 час. 50 мин. Раздались страшный грохот и чрезвычайно сильный взрыв. Вслед за тем над вулканом поднялось плотное серовато-красное, как бы огненное облако, вскоре ставшее черным, и покатилось со скоростью до 150 м/сек вниз по направлению к Сен-Пьеру. Эта мрачная туча, в которой, подобно искрам, мелькали огоньки и вспыхивали молнии, через минуту пронеслась через город и гавань, погубив около 26 000 жителей города и 17 кораблей, стоявших в гавани. Уцелел только один пароход — «Роддан». По описанию его капитана Фримана, эта катастрофа началась внезапно

ужасным шумом, как будто вся земля раскалывалась. Затем последовал сильный порыв ветра, раскачавший море и корабли. Через мгновение раскаленная туча промчалась с силой урагана по городу, вызывая всюду пожары. Огненный ураган продолжался несколько минут, а когда густой пепел осел, стало видно, что от города ничего не осталось — догорали лишь развалины зданий.

Раскаленная туча обрушилась и на «Роддан». Капитан Фриман, чтобы спасти людей и пароход, отдал приказание «полный назад». Пароход двинулся, столкнувшись раза два с соседним горевшим пароходом «Рорайма». Фриман видел двух человек, стоявших на мостике этого парохода неподвижно, со сложенными руками и героически ожидавших смерть. Один из них приветствовал Фримана взмахом руки. По словам единственного спасшегося пассажира «Рорайма» Г. Томсона, на пароходе было 68 человек.

Когда «Роддан» подошел к соседнему острову (на палубе был слой пепла 6 см толщиной), то оказалось, что половина команды и пассажиров мертвы, у остальных же были сильные ожоги. Через два дня и они умерли. Уцелели только два человека — капитан и машинист.

20 мая над остатками Сен-Пьера пронеслась еще более сильная раскаленная туча, разрушивая все, что еще частично сохранилось в городе. Извержения раскаленных туч наблюдались также 9 июня и 18 августа (второе зафиксировал молодой русский геолог Скоржинский). По его сообщениям, расстояние 6 км, от кратера до моря, туча прошла за 2,5 мин., т. е. 40 м в секунду. Особенно сильное из последних извержений произошло 12 сентября. Огненный ураган на этот раз захватил поселок Красный Холм и погубил 1500 человек.

В общей сложности в 1902 г. в результате деятельности вулкана Пеле погибло около 30 000 человек.

1919 год

В кратере вулкана Келуд, находящегося на острове Ява, обычно накапливается 30—40 млн. м³ воды, которая во время кратковременных извержений выбрасывается и, смешиваясь на склоне вулкана с песком, мелкими и крупными глыбами, образует грязевые потоки. С большой

скоростью они устремляются вниз и разрушают поселки и деревни, расположенные у подножия вулкана.

В 1919 г. грязевыми потоками, пронесшимися на расстоянии около 25 км, было полностью или частично разрушено 104 деревни, покрыто мощным слоем грязи 131,2 км² пашен. Погибло 5110 человек.

Кроме грязевых потоков это извержение сопровождалось выбросами раскаленных туч на расстояние 5—6 км от кратера и сильным пеплопадом, распространившимся на 300 км к востоку и 450 км к западу от вулкана.

Начало 1951 года

Гору Ламингтон, расположенную в восточной части острова Новая Гвинея, местное население не считало вулканом. Никаких легенд, связанных с ее извержениями, также не существовало. Да они и не могли быть, ибо последнее извержение (по определению абсолютного возраста) произошло около 13 000 лет назад.

И только 16 января 1951 г. гора Ламингтон внезапно ожила — появились струи пара и газов. Земля слегка заколебалась, и было выброшено небольшое количество пепла. С каждым днем извержение нарастало, а 21 января в 10 час. 40 мин. произошел очень сильный взрыв, поднявший на высоту 15 000 м огромные массы газов, вулканических обломков, песка и пыли. Вслед за взрывом изверглась раскаленная туча, уничтожившая все на территории площадью 250 км² и погубившая 2942 человека.

Конец 1951 года

В конце этого года случилось другое трагическое событие — извержение из кратера Хибок-Хибок вулкана Катарман на Филиппинских островах. До 1948 г. он находился в состоянии покоя около 75 лет, а в 1948 г. пришел в действие, временами извергая пепел и небольшие тучи, которые, впрочем, не причиняли большого ущерба. 4 же декабря 1951 г. произошло сильное извержение, выразившееся в мощных взрывах и выбросах больших количеств раскаленных обломков, пепла, пара, газов и агломератовых потоков, погубивших около 500 человек.

1963 год

В этом году произошло одно из катастрофических извержений вулкана Агунг на острове Бали в Индонезии. Оно возвестило о себе 19 февраля выбросами пепла, затем 24 февраля скатились небольшие горячие тучи, и началось излияние лавы. Наиболее грозное извержение было отмечено 17 марта, во время которого от раскаленной тучи погибло 1500 человек, от возникшего грязевого потока — 200 человек. В период второго пароксизма (16 мая) от горячей тучи погибло 120 человек. На соседние острова были эвакуированы 332 234 человека. Эти извержения разрушили более 2000 домов, 100 км дорог, 7 мостов и полностью уничтожили 53 670 гектаров пашен и 18 395 га леса.

1968 год

Вулкан Аренал, расположенный в Коста-Рике и находившийся несколько столетий подряд в покое (по исследованиям археологов, его последнее извержение произошло между 1200 и 1500 гг.), поздно ночью 28 июля начал содрогаться от серии подземных толчков. А утром в половине восьмого произошло извержение. Горячие газы, пепел, раскаленные глыбы пород и лавы все уничтожили на своем пути. Это извержение принесло смерть 78 жителям и опустошило 12 км² пашен и садов.

Около 1500 г. до нашей эры

Следует упомянуть еще об одном трагическом событии, подробности которого нам малоизвестны. Это — гибель города на острове Тера в Эгейском море.

В Эгейском море находился остров Стронгхили с довольно высоким вулканом Санторин. На острове существовали поселения. Около 3400 лет назад произошло катастрофическое, так называемое миноанское, извержение, в результате которого образовалась впадина (площадью 83 км², размерами 7—12 км в поперечнике и глубиной не менее 300—400 м ниже уровня моря) с тремя островками (остатки от бывшего здесь когда-то единого ост-

рова) Терой, Теразией и Аспронизи. Раскопками, начавшимися в 1967 г., на южном побережье острова был обнаружен город, засыпанный обломками пемзы и вулканическим песком. С большой долей вероятности удалось восстановить обстановку его гибели. Все началось с усиливающихся подземных толчков. Возможно, затем последовали достаточно сильные извержения вулкана, заставившие жителей уйти из города.

Гибель города произошла в результате колоссальной силы взрыва, выбросившего около 72 км³ пород, крупные и мелкие обломки которых покрыли склоны вулкана и окружающую местность слоем толщиной от нескольких до 60 м.

После раскопок, проведенных в городе, обнаружены дома из тесаного камня с деревянными колоннами. Хорошо сохранились фрески и различные предметы быта. Найдены также скелеты различных животных — собак, овец, свиней, но до сих пор не удалось отыскать скелет человека (хотя предполагается, что в городе жило около 30 000 человек) и золотые вещи. Это и заставляет предполагать, что люди спаслись, если только в пути по морю их не настигло цунами.

Масштабы потерь от вулканических извержений

Статистика человеческих жертв от вулканических извержений весьма несовершенна. Нередко существуют лишь указания на наличие «многих» или «нескольких» жертв, но число их не приводится. Некоторые данные завышены, а некоторые, даже официальные, явно занижены. Так, например, по официальным сообщениям, во время извержения вулкана Санта-Мария в Гватемале в 1902 г. жертв не было. Когда же через 14 дней после главного извержения прибыл ученый-географ К. Саппер в засыпанную на 1,5 м деревню, расположенную вблизи вулкана, то ему сообщили, что только что похоронили 56 трупов, а сколько людей еще засыпано, они не знают.

Саппер попытался подсчитать количество жертв с того времени, когда стало известно большое число действующ-

щих вулканов и значительно увеличились сведения об их деятельности, т. е. с 1500 г. (по данным на 1914 г.).

Р а й о н	Количество жертв
Средиземного моря	Около 3200
Атлантического океана	Более 10000
Индийского океана	Около 120000
Тихого океана	Около 57000
Всего	Около 190000

Если же принять число погибших при извержении вулкана Тамбора не 56 000, как считал Саппер, а 92 000 человек, согласно Каталогу действующих вулканов Индонезии (1951), то погибших с 1500 по 1914 г. будет около 225 000. Прибавленное к этим цифрам число жертв с 1914 по 1970 г. составляет (в общей сложности) около 240 000 человек.

Как уже говорилось, все сведения о количестве жертв не могли быть учтены. К тому же во многих случаях их вообще не было.

Вулканические извержения приносят большой ущерб народному хозяйству. Гибнут целые города, поселки, деревни. В Индонезии, которая вообще страдает от извержений больше всех стран, с 1772 по 1940 г. было разрушено около 650 деревень, уничтожены табачные поля, около 5 млн. кофейных деревьев. Гибнет в больших количествах и скот. Так, за этот же период в Индонезии от извержения погибло около 8000 голов рогатого скота. А совсем недавно, в мае 1970 г., в результате извержения в Исландии вулкана Геклы погибло около 7500 овец.

Приведенные данные не отображают всех потерь животного мира и материальных ценностей. Они дают лишь представление о характере и масштабах потерь в отдельных странах за некоторый период времени.

ВИНОВНИКИ БЕДСТВИЙ — ВУЛКАНЫ

Происхождение и строение Земли

Трагические события, о которых только что рассказывалось, происходят в результате деятельности вулканов. Среди разнообразных явлений природы она во все времена привлекала особое внимание человека.

Что же собой представляет вулканическая деятельность и вообще вулканизм?

Вулканизм — движение магмы в мантии, коре и на земной поверхности. Это сжатое определение коротко и ясно выражает сущность данного явления. Но что такое магма? Каков ее состав? Где она находится? Каковы источники энергии и процессы, приводящие к ее образованию? А движение магмы? Под влиянием каких сил, какой энергии приходит она в поступательное движение? Каковы пути ее движения? В каком состоянии выходит она на поверхность Земли и какие формы принимает на ее поверхности?

Возникновение вулканов, их жизнь и достаточно разнообразные и порой сложные проявления их деятельности связаны с концентрацией главным образом внутренней тепловой энергии Земли и с последующей ее потерей.

В познании глубин Земли еще многое неясно, а в объяснениях немало противоречий как в отношении состава ядра Земли, минерального и химического состава мантии и распределения в ней и в земной коре радиоактивных элементов, физического состояния вещества, так и ряда других явлений. Такое положение дел обязывает пока не утверждать, а лишь говорить о наших представлениях, которые кажутся более вероятными.

Какой бы мы ни придерживались гипотезы — «горячего» или «холодного» происхождения Земли, одно несомненно — первоначальное вещество нашей планеты родилось в «огне» и на одном из этапов ее жизни в обоих случаях было жидким. При «горячем» происхождении

первоначальное газовое вещество, охлаждаясь, стало жидким, а затем и твердым. При «холодном» — Земля образовалась в результате скопления холодных газовых и твердых частиц (последние до этого были также в газообразном, жидком и твердом состояниях). Сформировав нашу планету, они вновь расплавились под воздействием тепла, выделявшегося в результате разных причин: при распаде радиоактивных элементов, независимо от радиоактивности или вместе с ней, в результате сжатия — гравитационной энергии.

Вероятно, около 5 млрд. лет назад Земля приняла шарообразную форму — форму сфероида, состоящего благодаря гравитационной дифференциации из ряда слоев — геосфер. По сейсмическим данным (по скоростям продольных и поперечных волн), а также по плотностям вещества выделены восемь слоев, или зон. Первая зона (A) является земной корой мощностью от 5—10 до 60 км (в среднем 30—35 км), которая отделена от последующих зон «поверхностью», или разделом Мохоровичича. Последующие четыре зоны (B, C, D' и D''), называемые оболочкой, или мантией, располагаются на глубинах примерно от 10—60 до 2900 км, причем слои B и C составляют верхнюю мантию. Последние зоны (E, F, G) образуют ядро на глубинах от 2900 до 6370 км. Вся Земля находится в твердом состоянии, за исключением внешней части ядра (зона E) на глубинах от 2900 до 5000 км, вещество которой пребывает, по-видимому, в жидком состоянии. В ней не наблюдалось сейсмических поперечных волн, обычно не проходящих через жидкую среду.

Строение земной коры, по геологическим данным, а также мантии — по геофизическим данным, неоднородно в вертикальном и горизонтальном направлениях. Подтверждением этому является нахождение в верхней мантии под океанами на глубине от 50 до 400 км, а под материками — от 100 почти до 250 км областей с пониженными скоростями сейсмических волн (где должны были бы быть повышенные значения), названные волноводами. Образование их различные исследователи объясняют по-разному: одни — только повышением температуры (при этом считают, что ее увеличение с глубиной превалирует над ростом давления), другие — фазовыми переходами, выплавлением более легкоплавких составных частей. Последние в виде мелких жидких капель, являясь

менее плотными, поднимают очень медленно вверх и образуют в мантии волноводы.

На основании скачкообразного роста с глубиной скоростей сейсмических волн, увеличения плотностей вещества, учитывая также составы каменных и железных метеоритов, а для земной коры (зоны *A*) геологические и петрологические данные, состав Земли схематически представляется следующим образом. Земная кора сложена слоями осадочных пород, под ними — породами, по физическим свойствам аналогичными граниту, еще глубже — породами наподобие базальта.

Верхняя мантия (зоны *B* и *C*), предполагается, состоит из перидотита и эклогита или только эклогита и является, по всей вероятности, неоднородной. Зону *C* (называемую также «слоем Голицына»), расположенную на глубинах от 400 до 1000 км, составляет, по-видимому, то же вещество, что и зону *B*, но с более плотной упаковкой молекул. Нижняя же мантия (зоны *D'* и *D''*) — очевидно, однородного состава. Относительно ядра существуют две точки зрения. Согласно одной, ядро состоит из никелистого железа, согласно другой — из металлизированных силикатов.

Внутреннее тепло Земли

Земля является носителем тепла. Чем глубже, тем она более нагрета. На 100 м углубления температура в среднем повышается на 3°. Исходя из этой величины, называемой геотермическим градиентом, на глубине 1 км температура Земли должна быть 30°, на глубине 10 км — 300°, а на глубине 100 км — 3000°. Однако с глубиной величина геотермического градиента постепенно уменьшается и доходит, как считают некоторые исследователи, до 0,5 град/км, т. е. уменьшается в 60 раз.

Все известные в настоящее время способы определения температур внутреннего вещества Земли, а именно: прямое измерение изливающихся лав, определение температур плавления соответствующих минералов и горных пород, определение электропроводности, дают для глубин около 100 км значения от 900 до 1400° С. Что же касается температур на глубинах 10—50 км, то, по последним расчетным данным, они должны быть различными под материками и океанами, как показано в табл. 1.

Таблица 1

Температура в глубинах Земли

Км	Кбар	Температура, °С		Км	Кбар	Температура, °С	
		под материками	под океанами			под материками	под океанами
5	1,5	80—130	30	60	18,3	700—1140	1100
10	2,9	130—230	130	80	25	860—1260	1150
15	4,2	180—330	225	100	32,5	900—1300	1260
20	5,7	200—440	290	110	35	950—1500	—
25	7	290—560	360	150	40	1000—1550	—
30	8,5	300—650	400	160	60	1120—1700	—
35	10	310—650	420	200	70	1200—1930	—
40	11,6	400—650	850	300	100	1200—2400	—
50	15	700—850	1100	400	136	1280—2700	—

Для более глубоких недр Земли температуры следующие: на глубине 2900 км — 2200—4700°, на глубине 5000 км — около 5000°, а в самой центральной части — 5000—6000°, но считается, что температура там не может превышать 5000° С.

Таким образом, очевидно, что наша планета является носителем тепла, минимальное количество которого, по подсчетам Е. А. Любимовой, равняется $3,2 \cdot 10^{38}$ эрг, или $0,76 \cdot 10^{31}$ кал.

Эта тепловая энергия Земли, будучи первоисточником вулканизма, теряется, уходя в мировое пространство не только благодаря вулканической деятельности, протекающей обычно на относительно небольших площадях, но и всей поверхностью нашей планеты.

Величина теплового потока, выносящего тепло из недр Земли, на материках и океанах в среднем почти одинакова. По одним данным, она равняется $1,2 \cdot 10^{-6}$, по другим — $1,5 \cdot 10^{-6}$ кал/см² и ее считают «нормальной». В действительности, в поверхностной части Земли нет теплового равновесия, во всяком случае до 80 км, а по всей вероятности, и глубже, где температуры веществ под материками и океанами становятся одинаковыми.

Колебания величин теплового потока от среднего значения довольно большие. В некоторых местах — в 50—100 раз и более. Эти колебания зависят от многих причин — геолого-тектонического строения, возраста пород,

их теплопроводности, местонахождения действующих вулканов и др.

За время своего существования (4,5 млрд. лет) Земля, по-видимому, потеряла $(0,17-7,4) \cdot 10^{37}$ эрг, т. е. около 10% первоначального количества тепла. Доля потерь тепла от вулканической, в том числе и от гидротермальной деятельности, за последние 0,5 млрд. лет (с начала кембрия) составляет $2 \cdot 10^{29}$ кал, или $8 \cdot 10^{36}$ эрг.

Если принять одинаковое время общих потерь тепла, т. е. не 4,5 млрд. лет, а последние 0,5 млрд. лет (предполагая, что потеря тепла всей Землей происходила более или менее равномерно в течение всего времени, каковое обстоятельство вряд ли является верным), то потеря тепла выразится в среднем в $4 \cdot 10^{36}$ эрг, или около $1 \cdot 10^{29}$ кал. По другим данным, общая потеря тепла за это время $1,5-2 \cdot 10^{37}$ эрг, из которых $0,65 \cdot 10^{35}$ эрг израсходовано вулканической деятельностью. Данные показывают, что потеря тепла от вулканической деятельности мала по сравнению с общей потерей тепла всей Землей. Однако в более ранние этапы ее жизни вулканизм играл огромную роль, и потери тепла от вулканической деятельности были, по всей вероятности, гораздо значительнее.

Источники тепла Земли

Как отмечалось выше, Земля все время теряет очень большие количества тепла. Следовательно, должны существовать и мощные источники внутреннего тепла Земли. В качестве таковых можно рассматривать первоначальное тепло, долгоживущие радиоактивные изотопы — U^{238} , U^{235} , Th^{232} и K^{40} , гравитационную энергию сжатия. Крупными источниками тепла могут явиться энергия кристаллизации, особенно фазовые, полиморфные и электронные переходы, энергия химических реакций, количественные значения которых пока еще не вполне выяснены.

Наиболее важны предположения о выделении тепла при фазовых переходах вещества в минералы с более плотной упаковкой в слое Голицына (зона С). Подтверждением такого предположения явились опыты А. Е. Рингвуда и др. с одним из главных минералов зоны В и С оливином (Mg_2SiO_4). При давлении около

175 кбар, соответствующем давлению на глубине 500 км, оливин принимает более плотную структуру, причем энергия перехода равняется 293 кал/моль.

Переход оливина в вещества с более плотной структурой, предположительно, объясняется изменением связи между кислородом и магнием от ионной до ковалентной (атомной). При этом плотность вещества увеличивается на 18% и поглощается около 628 кал/моль гравитационной энергии.

Однако подобные фазовые переходы в слое Голицына еще недостаточно выявлены. Если во всем объеме слоя *C*, масса которого равна $98 \cdot 10^{25}$ г, произойдут такие переходы, то может выделяться количество энергии порядка $10^{36} - 10^{37}$ эрг ($0,25 \cdot 10^{29} - 0,25 \cdot 10^{30}$ кал). Этой энергии (исходя из годовой потери тепла Землей в настоящее время — около 10^{27} эрг, или $0,25 \cdot 10^{20}$ кал) хватило бы на поддержание нормального теплового потока в течение всего времени существования Земли.

Что же касается других видов энергии, выделяемых короткоживущими изотопами, космическим излучением, трением приливов, и др., то они являются второстепенными источниками тепла, составляющего небольшую долю в общем энергетическом балансе Земли.

Пути движения тепловых потоков

Тепловые потоки на материках и под океанами в среднем очень близки. Однако наблюдаются и значительные отклонения. Величина их колеблется почти от нуля до $5,0 \cdot 10^{-6}$ кал/см²·сек. Повышенные значения наблюдаются в вулканических областях и вообще в областях развития молодых кайнозойских образований, а пониженные — на площадях нахождения кристаллических щитов. Повышенные значения известны, например, на вершинах подводного Восточно-Тихоокеанского поднятия и на гребнях подводного Атлантического хребта, а пониженные значения — у их подножий.

Очевидно, во всей Земле существует общий единый фронт теплового потока, в отдельных участках которого происходят какие-то еще точно не известные нам процессы, поглощающие тепло, изменяющие направление его движения и увеличивающие его вынос.

Перенос тепла из глубин Земли при высоких температурах и давлениях к земной поверхности зависит от распределения внутренних источников тепла и теплопроводности вещества. Наличие регионального изменения значений теплового потока, например на основании анализа сейсмических данных, объясняется существованием гравиационных аномалий и различных мощностей земной коры в тех или иных областях, а также приуроченностью к относительным поднятиям границ раздела в коре и к глубинным разломам.

Гипотеза «тепловой конвекции», которая подвергалась серьезной критике, но еще окончательно не опровергнута, предполагает наличие особых путей — «струй», идущих из глубин мантии, по которым передается тепло в больших количествах. Эти «струи» тепла, поднявшись к поверхности Земли и земной коры, отходят в стороны, затем опускаются в глубины, нагреваются и снова поднимаются к поверхности, производя круговое или петлеобразное движение.

Существует мнение, что области современных геосинклиналей и находящиеся под ними пояса глубинных землетрясений связаны с особой, очень глубокой подвижной зоной, названной Ю. М. Шейнманом тектоноферой, по которой более интенсивно движутся потоки тепла. Такой постепенно поднимающийся из глубин мантии в кору поток тепла разогревает вещество зоны, способствует образованию магм.

Как видим, наши знания относительно путей движения тепловых потоков находятся в сфере гипотез.

Магма

Магма, образующаяся в глубинах Земли, представляет собой полностью или частично расплавленную, преимущественно силикатную массу, более или менее обогащенную растворенными в ней газообразными веществами. Предположительно, магма может возникать различными путями. Если исходить из гипотезы «горячего» происхождения Земли, то первоначально газообразное вещество при охлаждении должно было перейти в жидкое состояние и покрыть всю Землю. При дальнейшем охлаждении эта жидкая оболочка переходит в ее поверхностной части

в твердое состояние, оставаясь жидкой в более глубоких зонах Земли. Казалось бы, такой слой мог быть по всей Земле. Существовал или не существовал подобный жидкий слой на ранних этапах жизни Земли, неизвестно. Во всяком случае, в настоящее время сплошного жидкого слоя нет, если не считать внешнего слоя ядра (слой *E*), состоящего, как некоторые считают, из жидкого железа. По всей вероятности, этот слой не играет никакой роли в образовании магмы в мантии или в земной коре.

Переход из твердого состояния в жидкое (возникновение магмы) зависит от состава исходных веществ, соответствующих температур и давлений. Какая бы ни была геоструктурная обстановка, твердое вещество при упомянутых условиях может и должно перейти в жидкое состояние.

Условиями для выплавления и расплавления твердого вещества, залегающего в глубинах Земли, могут быть уменьшение давления и повышение температуры, зависящие от различных причин — тепловых потоков, флюидов, химических реакций и преобразований тех фазовых, полиморфных и электронных переходов, которые происходят с выделением тепла. Кроме того, определенные соотношения веществ (минералов), составляющих твердые растворы, эвтектические смеси, а также наличие летучих соединений и особенно воды значительно понижают их температуры плавления.

Естественно допустить, что выплавление и расплавление вещества и образование магмы должны происходить на таких глубинах, на которых температура вещества, слагающего верхнюю мантию, достигает температуры плавления этого вещества при соответствующем давлении.

Исходя из определения глубин вулканических землетрясений, предполагаемого почти полного или частичного непрохождения сейсмических поперечных волн на глубинах 50—60 км, можно заключить, что кровля магмообразующего слоя курило-камчатских вулканов находится на глубинах около 80 км.

По последним данным (С. А. Федотов, П. И. Токарев), в Камчатско-Японской зоне на глубинах 30—100 км обнаружены крупные экранирующие или поглощающие сейсмические волны тела, а на глубинах 120—150 км — область, поглощающая поперечные сейсмические волны. Последняя, предположительно считается областью генера-

ции магмы, которая концентрируется в упомянутые крупные тела, возможно, являющиеся магматическими очагами.

На основании частичного непрохождения сейсмических волн (или, как говорят, повышенного их поглощения), понижения их скоростей и еще некоторых данных в Курило-Японской зоне выявлены четыре ослабленных слоя (астеносферы) на глубинах 60—90, 110—160, 220—300 и 370—470 км (С. А. Федотов, Р. З. Тараканов). Подобные ослабленные слои обнаружены также в других областях нашей планеты, но на несколько иных интервалах глубин. Возможно, эти слои тоже являются местами образования магм.

Совершенно неожиданный метод определения глубин магматического очага по составу титаномагнетитов и их магнитным свойствам был предложен Г. Н. Петровой. Пользуясь им, можно выявить глубины очагов до 80 км. С помощью этого метода были установлены глубины очагов в районе Ключевского вулкана — порядка 50—60 км, на островах Парамушир — 25—35 км, Симушир — 50—60 км, Кунашир — 25—35 км. Таким образом, на глубинах 60 км и больше, учитывая ориентировочные температуры и давления, приведенные в табл. 1, могут существовать температуры выше температур плавления вещества верхней мантии (при соответствующем на той глубине давлении), при которых возможны, согласно проведенным опытам, его выплавление и расплавление.

Какой же состав вещества верхней мантии?

Исходя из состава каменных метеоритов, аналогичного составам перидотита и многих ксенолитов, вынесенных вулканическими извержениями, полагают, что на упомянутых глубинах верхняя мантия сложена преимущественно перидотитом или гранатовым перидотитом. Первый состоит главным образом из оливина и пироксена, а второй — из тех же минералов и граната. Существует мнение, что верхняя часть верхней мантии сложена эклогитом или пироксенитом, которые ниже сменяются перидотитом. А. Е. Рингвуд предполагает, что верхняя мантия под поверхностью раздела Мохоровичича сложена перидотитом и дунитом, ниже переходящими в гранатовый «пиролит» или в плагиоклазовый «пиролит», предположительно, состоящие из смеси одной части базальта и четырех частей дунита.

По В. С. и Н. В. Соболевым, верхняя мантия не является однородной, а носит сложный характер, по крайней мере до глубины 200 км, и состоит преимущественно из пород ультраосновного состава с незначительным количеством эклогитов. Ультраосновные породы на меньших глубинах представлены шпинелевыми, а на больших — гранатовыми перидотитами.

Исходя из микровключений в алмазах гранатов и пироксенов, образование которых возможно, по экспериментальным данным, при температуре около 1400° и давлении около 60 кбар, основная магма, создающая алмаз, вероятно, формируется на глубине около 150 км, причем не из воображаемого пиrolита, а из разных составов. При возникновении магмы в верхней мантии становится мало воды, но накапливается углекислый газ.

Таковы представления о составе вещества в верхней мантии. Эксперимент с зонной плавкой каменных метеоритов показал, что подобным процессом можно объяснить выплавление из перидотита верхней мантии базальтовой магмы и одновременную ее дегазацию (А. П. Виноградов).

Исходя из распределения температур в верхней мантии до глубин 400 км и сопоставления их с температурами выплавления и расплавления ультраосновных пород, главным образом перидотита, считается возможным выплавление из него в виде мелких капель более легкоплавкого, базальтового по составу вещества. Являясь жидким, менее плотным и менее вязким, оно становится более подвижным и, естественно, очень медленно поднимается вверх. Наличие жидких капель в верхней мантии создает упоминавшиеся выше волноводы.

Возникновение магмы, магматических очагов и закономерная смена состава магм, согласно точке зрения В. В. Белоусова, происходят по-разному в областях горообразования и в платформенных условиях. В первых (в геосинклинальных зонах) они связаны с выплавлением в волноводах в мантии из вещества перидотитового состава капель жидкого базальта, которые поднимаются и концентрируются в компактную массу — астенолит.

Благодаря уменьшению вязкости вещества астенолитов и возникновению в мантии разломов, а также притоку достаточно большого количества тепла, астенолиты, проплавляя вещество мантии, поднимаются к земной коре,

образуя магматические очаги. При этом на разных глубинах и соответственно различном составе боковых пород, окружающих подымающиеся, как бы всплывающие магматические очаги, происходит изменение состава магмы. Глубоко в верхней мантии в перидотитовой среде возникают очаги основной магмы. Продвигаясь сквозь породы мантии и метаморфизованные породы нижней части земной коры, формируются магмы среднего состава и, наконец, в очаге, поднявшемся еще выше в коре, образуется кислая магма, при этом значительную роль играет химическое взаимодействие между веществом очага и окружающими породами.

В проплавлении путей подъема магматических очагов и в расплавлении залегающих на пути пород играет большую роль тепло, которое несут с собой астенолиты с их магматическими очагами. Запас же тепла зависит от объема очагов, теплоемкости вещества и начальной температуры, которую Белоусов принимает за 1400° . С учетом этого, а также повышенных температур вещества, окружающего астенолиты, расплавление, по расчетным данным, возможно.

Поднявшийся, подобно пузырю, астенолит-магматический очаг сменяется новым, затем подымается еще один и т. д. Таким образом, возникает прерывистый ряд астенолитов-магматических очагов, вертикально или наклонно подымающихся по механическим ослабленным зонам (зонам разломов) к земной коре.

Иная обстановка в областях платформ. Здесь верхняя часть волноводов несколько охлаждена, и выплавление базальта (более основного, чем в геосинклинальных зонах) может происходить только в более глубоких частях волновода. При этом объединение выплавленных базальтовых капель в крупные астенолиты из-за большой вязкости на глубине и значительного уменьшения скорости перемещения должно происходить значительно труднее, чем объединение их в верхних частях волноводов.

Только вдоль глубоких крупных разломов базальтовая жидкость может скапливаться в магматические очаги и от них по трещинам подыматься и изливаться на земную поверхность.

Существуют и другие объяснения образования магмы. Давление повышает температуру плавления минералов, и чем оно больше, тем выше температура их плавления.

Если же произойдет значительное уменьшение давления (как говорят, перепад давления) вследствие появления разломов или каких-нибудь других тектонических нарушений, при которых минералы должны быть в жидком состоянии, они могут расплавиться и образовать магму.

Такой путь вызвал сомнения в возможности длительного существования трещин на глубинах, где господствуют большие давления. Если трещины появляются, то они должны очень быстро закрыться и прекратить магмообразование. Однако существуют мощные дайки (бывшие трещины), заполненные магматическим веществом длиной в километры, десятки и даже сотни. Например, длина Большой Дайки (Африка) — 540 км, а ширина — от 3 до 11 км.

И все же формирование магмы и магматических очагов в результате перепада давления считается возможным. Расплавление вещества мантии связывают с «арочным» эффектом (С. И. Субботин и др.) — в верхних частях мантий появляются дугообразные своды, под которыми из-за уменьшения давления и ряда других причин понижается температура плавления вещества, благодаря чему оно расплавляется и образуется магма.

Возможность возникновения магмы связывают с трением, происходящим при скольжении крупных глыб и слоев в результате горообразования. Механическая энергия трения при этом переходит в тепловую. Предполагается, что последней достаточно для расплавления на глубинах уже в известной степени нагретых пород и формирования магмы. Однако скольжение глыб происходит относительно медленно, и, следовательно, появляющееся в каждый момент движения тепло относительно мало и, по-видимому, должно более или менее быстро рассеиваться. А таким путем вряд ли возможно образование значительных масс магмы.

Высказывалось мнение, что вещество под «базальтовым» слоем земной коры находится в аморфном стеклообразном состоянии (т. е. является как бы очень вязкой переохлажденной жидкостью). В более глубоких частях с температурой около 1300° оно пребывает уже в жидком состоянии, т. е. является магмой.

Эта гипотеза встретила сильные и убедительные возражения сейсмологов, не обнаруживших признаков наличия жидкого слоя. Однако А. Риттманн считает, что сейс-

мика и не может его выявить, ибо вязкость магмы при больших давлениях очень велика, вследствие чего магма в этих условиях реагирует на кратковременные механические нагрузки как твердое тело. К тому же относительно тонкие жидкие слои магмы не могут быть определены сейсмикой, так как из-за своей малой мощности они не в состоянии препятствовать прохождению поперечных сейсмических волн.

Возможность существования в глубинах верхней мантии жидкого вещества допускается (В. С. Коптев-Дворников и др.) на основании опытов со сверхвысоким давлением, показавших при сжатии твердых и жидких веществ накопление в них колоссальной упругой энергии, переходящей при изменении давления в тепловую. Учитывая это, а также возможное наличие мощных тепловых потоков, идущих с больших глубин, предполагается, что на очень больших глубинах вещество Земли находится в расплавленном и одновременно в сильно сжатом состоянии с большим запасом упругой энергии. Более летучие составные части устремляются из расплава вверх и, обогащая ими вещество, значительно понижают его температуру. В результате при соответствующих температурах и давлениях на соответствующих глубинах происходит частичное или полное плавление вещества верхней мантии и образование магмы.

Расплавление вещества может вызвать тепло, которое происходит при синтезе воды. Известно, что при температурах выше 1200° почти вся вода диссоциирует на водород (H) и гидроксил (OH), которые ниже этой температуры соединяются в H_2O . Синтез происходит с большим выделением тепла, которое может способствовать расплавлению вещества и формированию магмы. Эта реакция способна играть значительную роль и в самом процессе извержения магмы.

Допускают также, что на больших глубинах в мантии существует вода в качестве «межзернистой жидкости». Благодаря такому ее распределению образуются зоны с малыми сейсмическими скоростями, и происходит начальное плавление глубинных пород, причем количество расплава, являющегося магмой, почти прямо зависит, по П. Уилли, от содержания воды и лишь незначительно меняется с изменением температуры и давления. Таким образом, возникновение магмы, согласно Уилли, зависит

от процессов поднятия воды из глубин мантии в слой с пониженными сейсмическими скоростями.

По всей вероятности, магмы зарождаются и в менее глубоких зонах Земли, на глубинах 10—20 км, в слое пород, по физическим свойствам близких граниту, или в более низком слое пород, подобных базальту, т. е. в среде сравнительно небольших давлений и относительно невысоких температур (см. табл. 1).

Если для расплавления вещества в глубинах верхней мантии и получения основной базальтовой магмы требуется или уменьшение давления, или добавочное, относительно небольшое количество тепла, чтобы температура вещества поднялась до температуры его выплавления или плавления, то для образования преимущественно кислых магм на относительно малых глубинах в земной коре необходим значительный привнос добавочного тепла или летучих соединений, главным образом паров воды.

В последние годы были высказаны предположения об образовании кислой магмы еще глубже — в верхней мантии. В этом случае следует допустить существование в мантии не только горячих тепловых потоков, но и нагретых до высоких температур водных флюидов (В. В. Аверьев). Предполагается, что возникновение флюидов связано с их обособлением из магмы и движением по другим (нежели тем, по которым движется магма), механически ослабленным путям в верхней мантии и в коре. Флюиды, взаимодействуя с веществами мантии и коры, видоизменяют их в конце концов, расплавляя, образуют более кислую магму. О возможности существования такого процесса свидетельствует расположение во многих местах вблизи друг друга базальтовых, андезитовых и более кислых вулканов (Ключевской, Безымянный, Аскья и др.).

Неоспоримым фактором является плавление твердого вещества при высоких давлениях и температурах, которое происходит в результате снижения давления или повышения температуры или путем сочетания обоих этих факторов. Большая часть гипотез о происхождении магмы сходится на том, что магма возникает в твердой среде преимущественно перидотитового состава. Однако, как упоминалось, существуют и другие мнения о возникновении магмы.

Исследователи отмечают особое влияние давления на ее состав. При давлении 30 кбар, которое соответ-

ствуёт давлению на глубине около 100 км, и температурах 1300—1350° из пород любого состава (но содержащих хотя бы в незначительных количествах все компоненты, входящие, например, в состав андезита) выплавляется наиболее легкоплавкое вещество андезитового состава, образующее среднюю (андезитовую) магму.

При давлении же 70—80 кбар, соответствующем давлению на глубинах 200—250 км, по мнению В. П. Петрова (хотя данных еще мало), должна выплавляться жидкость базальтового состава, являющаяся основной магмой. Образование ее разновидностей также зависит от изменения давления.

Полагают, что базальтовые магмы возникают на глубинах (по различным данным) от 35 до 100 км — толеитовая, от 150 до 200 км — высокоглиноземистая и от 250 до 350 км — щелочная.

Что касается происхождения кислой магмы, считают, что процессом ее рождения, вероятно, является выплавление из материнского материала эвтектических смесей (наиболее легко выплавляющихся веществ). Из смеси, взятой в определенных соотношениях, кварца, ортоклаза и альбита при повышенных давлениях и в присутствии воды выплавляется эвтектическая смесь, состав которой соответствует составу природного гранита, т. е. составу кислой магмы. Возможность получения гранитного материала подтвердилась также плавлением при повышенных давлениях глинистых пород в присутствии воды с добавкой раствора хлористого натрия. При давлениях до 2000 бар и при температурах 700—750° около половины всего материала перешло в расплав, соответствующий составу кислой магмы.

Каким путем, в результате каких процессов образуются магмы, пока нельзя однозначно ответить. Возможно, это происходит в результате различных процессов. Особенно трудно объяснить передвижение и подъем в верхней мантии жидких капель базальтового состава и их концентрацию в магматические очаги. По-видимому, необходимы соответствующие условия геоструктурного порядка, которые должны были бы в значительной степени уменьшить сопротивление среды, облегчить и ускорить подъем жидкого вещества.

Если суждения о генезисе магм находятся в области вероятных предположений, то существование их — факт,

не вызывающий сомнения (который подтверждается излияниями во время вулканических извержений огненно-жидкой лавы, представляющей собой магму, только лишённую в процессе движения в земной коре и особенно в процессе извержения значительной части содержащихся в ней газов).

Выяснение генезиса магм — одна из основных проблем изучения вулканизма, однако, видимо, гораздо важнее определить состав магм, их физико-химические свойства и энергию, чтобы познать весь динамический процесс — движение магм к поверхности и на поверхности Земли.

Можно почти определенно считать магму огненно-жидкой, преимущественно силикатной массой, хотя некоторые исследователи допускают газожидкое или даже газовое состояние магмы в глубинах Земли, что вряд ли верно.

Не касаясь состава первозданной магмы, возникшей на начальных этапах жизни Земли (ибо это область очень туманных предположений), коротко охарактеризуем состав двух главных первичных магм, образовавшихся в геологическую стадию эволюции Земли, — основной, или базальтовой, и кислой, или гранитной (выделяют как первичную магму еще ультраосновную). Они различаются главным образом содержанием кремнезема, некоторых окислов и соответственно при их кристаллизации и образовании горных пород — содержанием минералов. В магмах от 40 до 75% окиси кремния, остальное — окиси алюминия, железа, магния, кальция, натрия, калия, титана, фосфора, водорода. В незначительных количествах присутствуют почти все другие химические элементы. Кислая магма пересыщена кремнеземом, а основная и в особенности ультраосновная им недосыщена. Кислые породы обогащены кремнеземом и отчасти щелочами, а основная — окислами железа и магния. Кроме того, кислая магма более обогащена летучими соединениями. Основная магма обычно менее вязкая, более подвижная, более текучая, кислая — более вязкая, менее подвижная. Другие магмы являются как бы производными от упомянутых двух магм, образующихся в результате различных процессов дифференциации или ассимиляции. Существуют также обогащенные щелочами кислые и основные магмы.

Магма разделяется не только по химическому составу, но и по физическому состоянию на гипомагму, пироматму и эпимагму. Первая — малоподвижная, недосыщенная газами — может существовать только при давлениях, превышающих давление пара молекулярно растворенного газа. Вторая — подвижная, пересыщенная газами, пузыристая или пенистая. Третья, бедная газами, почти дегазированная и более охлажденная, подобна еще не излившейся лаве.

Магма является как бы аккумулятором энергии, и эта энергия — главная сила в динамических процессах вулканизма. Тепловая энергия накапливается в магматическом очаге, и запас ее зависит от температуры, состава, массы магмы и глубины ее нахождения.

Ориентировочное представление о количествах добавочной тепловой энергии, необходимых для расплавления твердого вещества в зависимости от его состава и глубины залегания, а также получения некоторых магм, дают следующие цифры, взятые из статьи Ю. М. Шейнмана. Для получения 1 км³ оливино-толеитовой (разновидность базальтовой) магмы, содержащей до 1% воды, на глубине 60 км необходимо около $2,9 \cdot 10^{18}$ кал, а на глубине 90 км — около $1,86 \cdot 10^{18}$ кал энергии.

Магматические очаги

Насколько можно предполагать, магма, образовавшаяся в результате выплавления или расплавления вещества мантии, концентрируется отдельными струями по сетке трещин в очаги различной формы. Сосредоточиваясь в трещинах и трещинках, магма принимает столбообразную форму, создавая вертикальные очаги. Если продвижение магмы происходит преимущественно проплавлением, то, вероятнее всего, возникают очаги примерно шапкообразной формы. От главного очага возможны ответвления — сравнительно небольшие очаги, называемые апофизными, или периферическими. Об их форме судят по формам залегания глубинных изверженных горных пород.

Магма, подобно клину, может внедриться в механически ослабленные места, например между слоями различных пород, притом нижние слои опускаются, а в образующееся пространство, как бы меняясь местами, вли-

вается магма, и формируется относительно плоский магматический очаг.

Все эти и другие очаги принимают свою форму в зависимости от конкретных условий — трещиноватости в верхней мантии и в земной коре от давления и кинетической энергии магмы.

О величине очагов отчасти можно судить по объему выделившихся магматических продуктов. Почему отчасти? Потому что во многих случаях неизвестно, весь ли материал очага был извергнут и магматический очаг представлял замкнутую систему или же он все время, или периодически пополнялся магмой. Для длительно действовавших вулканов, вероятно, последнее предположение является правильным, а для кратковременно действовавших — первое.

По объемам извергнутого магматического материала можно составить представление о величине очагов. Так, по подсчетам В. А. Ермакова, в районе Ключевской группы вулканов на Камчатке в течение четвертичного времени были извергнуты следующие объемы материалов: вулканом Средним — около 1 км³, Безымянным — около 10 км³, Ключевским — около 200 км³, Острым и Плоским Толбачиками — около 392 км³, Ближним и Дальним Плоскими вулканами — около 2230 км³. Первые три вулкана выбросили указанное количество материалов в течение 10 тыс. лет, следующие два — за 230 тыс. лет, и последние — за 450 тыс. лет.

Объем очага вулкана Этны в Сицилии определяют в 300 км³, вулкана Мауна-Лоа на Гавайских островах — не менее 42 000 км³.

Может быть вовсе и не существует очага Мауна-Лоа столь огромного размера, так как, весьма вероятно, происходили периодическая подача магматического материала из более глубоких зон Земли в относительно небольшой очаг и затем извержения.

Движение магм

Магма, являясь следствием каких-то пока гипотетических причин, сама в свою очередь — причина других достаточно разнообразных процессов. В зависимости от ее состава, массы и температуры, от той энергии, которой она обладает, а также структурной обстановки в верхней

мантии и в земной коре жизнь первичной магмы протекает по трем главным направлениям.

В начальной стадии магма, будучи менее плотной, менее вязкой, чем твердое вещество окружающей ее среды, стремится передвигаться. Об одном из способов ее перемещения из глубин вверх проплавлением было уже сказано. Магма продвигается до тех пор, пока ее кинетическая энергия сможет преодолевать сопротивление и давление окружающей среды. Но как только эта энергия станет равной или меньшей сопротивления среды, магма остановится, и, остывая в течение геологически очень длительного времени, превратится в породу, соответствующую ее составу, или, медленно дифференцируясь, — в ряд пород.

Если же энергия магмы будет больше силы сопротивления и давления на нее окружающих пород, то магма, по всей вероятности, сама может образовать каналы над очагом. Тем не менее, по-видимому, главной причиной происхождения каналов являются разломы, формирующиеся в результате горообразовательных или других тектонических процессов, нарушающие целостность налегающих на очаг пород. Возникающие при этом в результате растяжения трещины могут быть закрытыми, т. е. не доходят до земной поверхности, а сквозными — выходят на ее поверхность.

В момент образования над магматическим очагом трещин магма сразу же стремится их заполнить и под влиянием давления на стенки очага, уменьшения давления в очаге у самой трещины, а также уменьшения плотности и вязкости огненно-жидкой магмы поднимается по трещинам вверх. Достигнув некоторой высоты, на которой давление газов, растворенных в магме, становится равным или большим по сравнению с давлением расположенных над ней веществ, газы начинают бурно выделяться из магмы и еще более энергично увлекать ее к земной поверхности. Исчерпав свою кинетическую энергию, магма останавливается на пути вверх и, приняв форму того пространства, которое она заполнила на последнем этапе своего продвижения, начинает остывать и кристаллизоваться. Эти формы залегания отвердевшей магмы, т. е. магматических глубинных пород (гранитов, диоритов, габбро и др.), носят различные названия: дайки, лакколиты, бисмалиты, штоки, батолиты.

Если еще достаточно активная магма заполнит в верхней мантии или чаще в земной коре подобные пустые пространства, соединенные каналами как с очагом первичной магмы, так и с земной поверхностью, то они превратятся в периферические очаги. Над ними возникают каналы в результате тех же причин, что и трещины, идущие от подкоровой первичной магмы. Однако каналы от первичного магматического очага и в особенности от периферических очагов, по-видимому, формируются и вследствие других причин.

Одной из причин образования каналов, особенно в зонах сжатия, является просверливающее и прорывающее действие газов, выделяющихся из магмы. В некоторых областях, где горообразовательные процессы не происходили во время возникновения вулканических каналов, последние формировались под воздействием только вулканических газов.

Другая причина возникновения каналов — вулканическое тепло, которое складывается из внутреннего запаса тепла магмы плюс тепло, получаемое в результате предполагаемых различных химических реакций в магме и реакции между газами. Все это настолько повышает температуру магмы, что она способна проплавить себе путь к поверхности.

Если энергия магмы достаточно велика, то она достигает поверхности Земли и производит вулканические извержения.

Известно, что вулканы расположены не только в зонах растяжения, но и в зонах сжатия земной коры. В таких случаях предполагается, что зона сжатия приурочена только к верхним слоям Земли, а несколько глубже она сменяется зоной растяжения. Так, в Курило-Камчатской зоне (В. Н. Аверьянова и др.) на глубине до 50 км преобладают горизонтальные растягивающиеся и вертикально сжимающиеся напряжения, а глубже от 50 до 200 км, наоборот, преобладают горизонтальные сжимающие и вертикальные растягивающие напряжения.

Таким образом, магма в зависимости от ее энергии и тектонической обстановки может остаться вблизи места образования, подняться вверх и застрять в земной коре и, наконец, вырваться на земную поверхность, покрывая ее на малых и относительно больших площадях лавой и крупными, мелкими и мельчайшими обломками.

Причины извержений

Магма, являющаяся, как уже отмечалось, силикатным расплавом с растворенными в нем газами, может быть однородной — однофазовой, находящейся в одном жидком агрегатном состоянии, двухфазовой — в жидком и газообразном агрегатных состояниях, многофазовой — в трех агрегатных состояниях и представлять собой смесь жидкости, газообразных веществ и твердых кристаллов. В зависимости от соотношений этих веществ и их свойств (в основном вязкости) вид и характер извержений различны.

Обычно извержения начинаются тогда, когда нарушается равновесие между энергией магмы и сопротивлением (давлением) окружающей среды. Чаще всего это происходит в результате образования трещин, возникающих от тектонических движений, или реже — под давлением магмы и ее газов. Последние играют большую роль при возникновении трубообразных каналов, особенно там, где происходит (по геофизическим данным) сжатие пород земной коры. В более глубоких зонах Земли в этих районах, по-видимому, должны действовать силы растяжения.

О возможности перехода трещинных каналов, образующихся обычно от растягивающих усилий, в трубоподобные свидетельствует Алмазная трубка в Кимберлее (Африка). Вообще выделяющиеся во время извержений под сильным давлением газы используют малейшие трещины или пересечения трещин и просверливают каналы, а также значительно их расширяют. Так, во время преимущественно газового извержения Везувия в 1906 г. кратер вулкана расширился в диаметре со 175 до 700 м; стенки его, наклоненные до извержения под углом 35° , после извержения имели наклон от 65 до 75° . Глубина кратера увеличилась с 75 до 500 м.

Причины извержений и их механизм различны. Одни извержения выражаются преимущественно в излиянии жидкой или преимущественно жидкой лавы, бедной или относительно богатой газами. Это так называемые эффузивные, изливающие лаву извержения. Другие извержения, называемые экструзивными, заключаются в выжимании полупластичной или почти твердой лавы, бедной

газами, или сопровождаются очень обильными их выделениями. Третьи извержения — взрывные — характеризуются кратковременными взрывами колоссальной или умеренной силы; периодическим, ритмическим или непрерывным выбрасыванием газов и паров воды, комков жидкой и полупластичной лавы, обломков и глыб. И, наконец, наблюдаются эмиссионные — выдувающие извержения, заключающиеся в сильных и обильных выбросах газов и паров с небольшой примесью мелких обломков лавы, в выделениях относительно слабых струй и клубов пара и газов. Однако происходят не только «чистые» извержения, но и довольно часто — смешанные с элементами упомянутых извержений.

Теоретически извержения возникают от разных причин. Каковы же те силы, которые приводят магму в движение к поверхности Земли и к ее извержению? Они могут быть внешними и внутренними, но чаще действуют совместно или в некоторой последовательности.

Образование трещин в кровле магматического очага, давление на него, вызванное, например, опусканием глыб кровли на очаг или другими путями, могут явиться причиной внедрения магмы в вертикальные и горизонтальные трещины и ее извержения даже без особого участия других факторов.

О таком механизме извержений свидетельствуют плотные вулканические породы, заполнившие как вертикальные или относительно вертикальные трещины, обычно называемые дайками, так и горизонтальные или почти горизонтальные трещины, называемые sillами, или пластовыми залежами. Одним из примеров является боковое извержение вулкана Килауэа в 1955 г., которое началось излиянием лавы по трещине без взрывов и видимых газовых проявлений.

При давлении на магматический очаг (обычно магмы меньшей плотности по сравнению с плотностью окружающей твердой среды) и возникновении трещины в кровле очага, а следовательно, с образованием пустоты в этом месте, магма может прийти в движение, подняться по трещине вначале и без участия газов. Этими причинами объясняется, особенно у бедных газами магм, возникновение эффузивных извержений. Извержения же эффузивно-взрывные и их механизм обусловлены следующими причинами.

Газы, особенно в основной магме, выделяясь из нее, образуют пузыристую пиромagma и могут увлекать ее по трещинным или трубоподобным каналам к земной поверхности. При этом, если магма маловязкая, то выделение газов и передвижение основной магмы происходят довольно легко и быстро. В кислой же магме вследствие ее большей вязкости выделение газов гораздо медленнее. Кроме того, при образовании трещин в кровле магматического очага в нем внезапно уменьшается давление, благодаря чему начинается сильное выделение из магмы растворенных в ней газов, которые увлекают с собой magma, изливающуюся затем на поверхность Земли достаточно пористой или пузыристой лавой.

Магма и сосредоточенные в верхней части очага пары воды и газ, находящиеся под большим давлением, начинают постепенно охлаждаться, вследствие чего кристаллизуется magma и уменьшается ее объем, но в связи с этим усиливается выделение газов, скапливающихся в верхней части очага. Этот процесс, создавая сильное давление газов в верхней части очага, продолжается до момента образования трещин. При этом давление газов в верхней части очага сильно уменьшится, а давление газов кристаллизующейся magma сначала станет равным давлению газов в верхней части очага, а затем и больше его. Произойдет бурное выделение газов, как бы вскипание (называемое ретроградным кипением) кристаллизующейся magma, и в результате начнется извержение магматического вещества, находящегося в момент извержения в трех агрегатных состояниях — газообразном, жидком и твердом (раскристаллизовавшаяся часть magma).

Основой движущих сил взрывных извержений являются газы. В результате каких же причин они происходят? Магматические очаги, если в них наблюдаются извержения, являются и вулканическими очагами. Они, по-видимому, содержат различные количества газов, среди которых преобладают пары воды. Взрывчатость magma зависит от ее вязкости и отчасти кислотности, а главным образом от количества газов и создаваемого ими давления, а в некоторых случаях от состава горных пород, с которыми magma и газы соприкасаются. Давление, создаваемое взрывом, при обычных извержениях чаще всего колеблется от 100 до 500 атм, но при особо сильных извержениях оно достигает 2500—3000 атм.

Причиной взрыва, по Ферхугену, является увеличение количества пузырьков (паров воды) на единицу объема расплава за единицу времени, т. е. взрыв происходит в результате быстрого выделения и расширения находящихся в магме газообразных веществ, главным образом паров воды. По расчетам Е. К. Мархинина, для взрыва с энергией взрывной волны $4 \cdot 10^{23}$ эрг, в результате которого выбрасывается около 1 км^3 обломочного материала, требуется содержание в лаве 2,5 вес. % паров воды.

Когда магма достаточно богата парами воды и газами, извержение может происходить в результате перехода гипоматмы в пироматму. Выделяющиеся в ней пузырьки увеличивают ее объем и, когда они достигнут плотнейшей упаковки, объем пироматмы по сравнению с первоначальным объемом гипоматмы увеличится, по А. Риттманну, в 3,84 раза.

Следовательно, по мере выделения пузырьков и их расширения пироматма станет занимать все большее пространство в канале и на земной поверхности, образуя пузыристую лаву. Если же пузырьки продолжают расширяться, то произойдет разрыв магматических оболочек на мелкие капли. Если вещество пироматмы будет очень вязким, пластичным или даже частично отвердевшим, то при дальнейшем расширении газов и паров воды произойдет его разрыв на мелкие еще раскаленные обломки и выброс их на земную поверхность.

Переход гипоматмы в пироматму должен быть постепенным, по мере уменьшения давления в канале и в верхней части вулканического очага. Этот процесс может осуществляться до полного перехода магмы в пироматму. Если же в очаге возникнет достаточное давление, например закупоркой канала, то переход в пироматму прекратится, а значит и прекратится вынос ее на земную поверхность.

Если над магматическим очагом, находящимся на глубине 50 км, образовалась трещина на протяжении, допустим 1 км и шириной 20 м, выклинивающаяся на глубине 5 км и переходящая в трубообразный канал диаметром 200 м, то объем этих каналов будет несколько меньше $0,5 \text{ км}^3$. Следовательно, если объем магматического очага и значит гипоматмы равняется 1 км^3 , то вследствие перехода ее в пироматму с плотной упаковкой пу-

зырьков она должна занять пространство в $3,84 \text{ км}^3$ и излить на земную поверхность около $2,3 \text{ км}^3$ пузыристой лавы.

Если же выделяющиеся пузырьки газа не достигнут плотной упаковки, что в действительности должно чаще наблюдаться, то и увеличение объема образующейся пиромاغмы будет зависеть от объема образовавшихся пузырьков. Если объем пиромاغмы увеличится в 2 раза по отношению к объему первоначальной гипомاغмы, то при приведенных размерах очага и каналов выльется только благодаря расширению пузырьков около $0,5 \text{ км}^3$ лавы.

По мнению некоторых исследователей, взрывные извержения происходят от бурных химических реакций. Так, И. И. Гущенко, исходя из содержания в фумарольных газах взрывоспособных газовых компонентов Cl_2 , H_2 , OH , CO , F_2 , H_2S , CH_4 и допуская возможность их присутствия в значительных концентрациях в магме, предположил, что, взаимодействуя по типу цепной реакции, они вызывают мгновенный взрыв.

Действительно, упомянутые газовые компоненты, по всей вероятности, находятся в магме, но находятся ли они в необходимых для взрыва концентрациях, пока еще неясно. В настоящее время известно, что в фумарольных газах находится 2—10% взрывоспособных газовых компонентов и только в единичных случаях до 60% объема всей газовой смеси.

Возможность извержения связывают также с выделением тепла, происходящим при некоторых процессах, например, при кристаллизации магматического вещества, фазовых переходах и др.

Одной из причин, вызывающих извержение, является привнос морской или грунтовой воды в магматический очаг или в наполненный магмой канал. Вода, попадая на огненно-жидкую магму, превращается в пар, объем которого при 100° увеличивается примерно в 1670 раз, и происходит извержение, называемое фреатическим. Следует учитывать, что 1 кг сжатых и перегретых до 600° паров воды, расширяясь, может произвести работу, соответствующую выделению около 10^{13} эрг энергии, т. е. выбросить глыбу весом около 100 кг на высоту до 1 км.

Вулканическая энергия

Магма в очаге является аккумулятором энергии, величина которой зависит от состава, массы и температуры магмы. Эта энергия и является главной силой в динамических проявлениях вулканизма.

Первичные магматические и периферические очаги, связанные каналами непосредственно с земной поверхностью, по которым происходят извержения, являются в то же время и вулканическими очагами. О количестве вулканической энергии в этих очагах можно иметь ориентировочное представление по потерям энергии, затрачиваемой на вулканическую деятельность, а именно: на подъем магмы по каналам к поверхности Земли, на извержение, на остывание лавы и ее крупных и мелких обломков, на разламывание горных пород; на фумарольную, сольфатарную и гидротермальную деятельность, происходящую в промежутках времени между извержениями; на прогрев вещества, окружающего длительно действующие вулканические очаги; на вулканы и цунами, возникающие при подводных или прибрежных извержениях.

Основными видами внутренней энергии Земли, по Йокояма, являются: 1) потенциальная энергия, учитываемая по изменению уровня лавы в вулканах в течение извержения; 2) кинетическая энергия извержения, определяемая скоростью и массой выбрасываемых из кратера вулканических продуктов; 3) термальная энергия, определяемая количеством тепла, заключенным в лаве, вулканических обломках и газах; 4) сейсмическая энергия и энергия воздушных волн, определяемые величиной смещения почвы (на сейсмографах) и изменением давления воздуха (на микробарографах).

Из них в вулканической деятельности наиболее важную роль играет термальная энергия, которая во многих случаях в 10, 100 и 1000 раз больше всех остальных видов энергии, вместе взятых. Обычно ее величина характеризует всю энергию извержения, так как другие менее значительны и их точную величину труднее учесть.

Довольно общее представление о величине потерь термальной энергии в результате эффузивных извержений можно получить, зная состав магмы, величину ее массы, теплоемкость, разность температур и скрытую теплоту кристаллизации.

Основываясь на значениях температур изливавшихся, преимущественно базальтовых, лав, надо полагать, что в магматических очагах температура была не ниже 1200° , а вероятнее всего — около 1400° С.

Таким образом, количество тепла, теряемое при остывании одного кубического километра базальтовой магмы в диапазоне температур от 1400° до 0° при теплоемкости, составляющей приблизительно 0,3 кал/град, плотности около $2,8 \text{ г/см}^3$ и скрытой теплоте кристаллизации 100 кал/г, определяется величиной, равной $1,456 \cdot 10^{18}$ кал.

Исходя из этой цифры, можно получить ориентировочное представление о потерях тепловой энергии, вынесенной лавами и ее обломками, при образовании различных базальтовых вулканов. Так, на сооружение камчатских вулканов — Среднего объемом около 1 км^3 было израсходовано примерно $1,4 \cdot 10^{18}$ кал; Безымянного объемом 10 км^3 — около $1,4 \cdot 10^{19}$ кал, а Ключевской, объем которого почти 200 км^3 , для своего формирования потребовал приблизительно $2,9 \cdot 10^{20}$ кал тепловой энергии.

Вулканическая деятельность выражается не только в излиянии лав и выбросах их обломков, но и в фумарольных и гидротермальных проявлениях. Однако на количественную оценку потерь тепла не обращали особого внимания. Когда же в последние годы стали ее изучать, оказалось, что она достаточно велика. Так, выделяющиеся между извержениями газы, пары воды и горячие источники выносили следующие количества тепла: Эбеко (Курильские острова) — 24 000 ккал/сек, Уайт (Новая Зеландия) — 290 000 ккал/сек, Мутновский (Камчатка) — 446 000 ккал/сек (Б. Г. Поляк).

О масштабах израсходованной энергии единичными достаточно сильными извержениями можно судить по данным, приведенным Г. С. Горшковым для взрывных извержений Безымянного 30 марта 1956 г. и Швелуча 12 ноября 1964 г.

	Безымянный	Швелуч
Энергия взрывной волны	$3 \cdot 10^{23}$ эрг	$1,8 \cdot 10^{23}$ эрг
» кинетическая	$1,2 \cdot 10^{24}$ эрг	$1 \cdot 10^{24}$ эрг
» термическая	$3,8-4 \cdot 10^{25}$ эрг	$1,3 \cdot 10^{25}$ эрг
Начальная скорость взрыва	360—500 м/сек	280—310 м/сек
Начальное давление	1500—3000 атм.	800—1000 атм.
Количество выброшенного материала	2—2,5 км ³	1,5 км ³

Если энергию, теряемую во время самого извержения, сравнить с тепловой энергией, расходуемой во время фумарольной и гидротермальной деятельности, то из приведенных примеров видно, что тепловая энергия фумарольной деятельности, примерно равная $3,5 \cdot 10^{22}$ эрг/год, почти соответствует энергии взрывной волны вулкана Безымянного и на один порядок больше для вулкана Шелуча. Кинетическая же энергия извержений этих вулканов превышает на два, а термальная на три порядка термальную энергию фумарол и горячих источников вулкана Эбеко.

Таким образом, в результате фумарольной и гидротермальной деятельности, например вулкана Эбеко, теряется в течение почти 1000 лет такое количество тепла, какое упомянутые вулканы выделили за одно извержение.

Что касается потерь энергии вулканическими областями, например на Камчатке, то в течение четвертичного времени приблизительно за 1 млн. лет расходовалось в среднем в секунду $5,38 \cdot 10^9$ кал, т. е. $1 \cdot 10^{25}$ кал за весь период (Б. Г. Поляк). На стадию подготовки извержений терялось энергии: на подъем магмы к земной поверхности — 14,1%, сейсмомеханической — 0,2%, на остывание раскаленных вулканических продуктов (лав и их обломков) — 43,5%, на фумарольную деятельность, происходившую между извержениями, — 32,7%, на прогрев пород, окружающих вулканические очаги, — 3,9% и на прогрев воды, циркулирующей около канала вулкана и, возможно, поблизости периферических очагов, — 5,6%.

Таким образом, главные потери энергии произошли в результате остывания вулканических продуктов, фумарольной деятельности и подъема магмы, что составляет 90% всех потерь энергии.

Для определения величины термальной энергии, расходуемой во время лавовых извержений, Йокоямой (1957) предложена формула

$$E = v\sigma(T\alpha + \beta)I,$$

а для взрывных — формула

$$E = v\sigma T\alpha I,$$

где E — термальная энергия; v — объем извергнутого материала; σ — плотность его; T — температура лавы;

α — удельная теплоемкость лавы; β — скрытая теплота плавления лавы; I — эквивалент работы тепла (в эрг).

Для характеристики силы извержений П. Хедервари предложил новую величину — магнитуду извержения, которая является величиной, пропорциональной выделившейся энергии. Определяется она формулами

$$M = \frac{\log [v\sigma (T\alpha + \beta) I] - 11}{1,6},$$

для извержений, соответствующих первой формуле Йокоямы, и

$$M = \frac{\log [v\sigma T\alpha J] - 11}{1,6}$$

для извержений по второй формуле Йокоямы.

Таблица 2

Вулкан	Характер извержения*	Год извержения	Объем	Энергия	Атомный эквивалент	Магнитуда извержения
Халемаумау	л	1924	0,00024	$8,824 \cdot 10^{21}$	1,05	6,84
»	л	1927	0,00242	$8,898 \cdot 10^{22}$	10,6	7,47
»	л	1952	0,04893	$1,799 \cdot 10^{24}$	214,2	8,28
Ключевской	лп	1937— 1938	0,174	$1,982 \cdot 10^{24}$	236,0	8,31
Гекла	л	1947— 1948	0,40	$1,257 \cdot 10^{25}$	1496,4	8,81
Таравера	п	1886	1,5	$1,440 \cdot 10^{25}$	1714,3	8,85
Кракатау	пв	1883	18,0	$1,810 \cdot 10^{26}$	21547,6	9,54
Тамбора	п	1815	150,0	$1,440 \cdot 10^{27}$	171428,6	10,10

* л — преимущественно лавовые излияния.

п — обломочный материал взрывного извержения.

в — подводные извержения.

Кроме того, Хедервари предложил выражать энергию вулканических извержений атомно-бомбовым эквивалентом, т. е. количеством атомных бомб, могущих дать соответствующую энергию при взрыве. Значение энергии одной атомной бомбы им принято $8,4 \cdot 10^{21}$ эрг, или $2 \cdot 10^{14}$ кал. В табл. 2 приводятся величины объемов извергнутого материала (в км³), соответствующая тепловая энергия (в эрг), а также атомные эквиваленты и магнитуды извержения (по Хедервари).

Вулканические каналы

В результате тектонических движений или давления магмы и ее газов в верхней мантии и особенно в земной коре образуются трещинные (линейные) или трубообразные (центральные) каналы, по которым к поверхности Земли поднимается магма и происходит извержение.

Некоторые исследователи допускали существование и площадных вулканических каналов, которые возникли на ранних стадиях геологической жизни Земли вследствие проплавления крупными магматическими телами земной коры до самой ее поверхности. В последние годы в Северо-Байкальском нагорье на площади около 400 км² обнаружена дацитовая порода, извергнутая свыше 1,5 млрд. лет назад, предположительно по площадному каналу.

Однако в вулканической жизни Земли большую роль, особенно в более древнее время, играли извержения по трещинам. В новейшее время преобладают извержения по трубообразным каналам, которые, вероятно, на глубине переходят в трещинные. О широком распространении трещинных каналов свидетельствуют огромные массы базальтовых лав, излившихся из многочисленных трещин и покрывших в докембрии (более 600 млн. лет назад) в Северной Америке, у Верхнего озера 100 000 км², в триасе и юре (от 240 млн. до 140 млн. лет назад) в Южной Африке — не менее 50 000 км², в меловое и нижнетретичное время (от 130 млн. до 40 млн. лет назад) в Индии, в Декане — более 1 млн. км², в четвертичное время (от 2 млн. до 1 млн. лет назад) в Северной Америке в районе рек Колумбии и Снейк — около 400 000 км². Вулканы с трещинными каналами, действующие в настоящее время, известны в Исландии. Некоторые из них в процессе извержений превращаются в центральные.

Трещины бывают радиальные, идущие по радиусам от центрального канала (вулкан Острый Толбачик и др.), и круговые, окаймляющие на том или ином расстоянии центральный канал или внедрившееся магматическое тело. Круговые трещины, направленные от центра, образовавшиеся в результате опускания кровли в магматический очаг, называют кольцевыми (остров Малл в Шотландии), а направленные к центру, возникшие в результате давления поднявшейся вверх магмы, — коническими слоями (остров Скай в Шотландии).

По сравнению с трещинными каналами трубообразные отличаются большим разнообразием форм — в виде прямого, слегка изгибающегося или наклонного столба; ствола дерева с ветвями, отходящими вверх, к поверхности вулкана (Ключевской, Везувий и многие другие); ствола с нисходящими туннелями, начинающимися у вершины вулкана и спускающимися вдоль его склона (Этна) и др.

Характер извержений

Характер извержений зависит от состава магмы, ее вязкости, температуры, а также от агрегатного состояния, т. е. от количественных соотношений составных частей магмы — жидкого, твердого и газообразных веществ. В некоторых случаях — от тектонического и гидростатического давления, от формы канала и вообще от внешней среды.

Вулканическое извержение — сложное явление. Небольшое изменение вязкости магмы или содержания в ней газов и паров воды сразу же отражается на характере извержения.

Извержения бывают кратковременными и очень длительными, могут происходить по трубообразным, трещинным и площадным каналам.

В трещинных каналах наблюдаются излияния лавы и взрывные извержения, а также явления смешанного характера, т. е. излияния лав чередуются или сопровождаются взрывами. По трубообразным каналам, кроме упомянутых типов извержений, происходят еще выжимания пластичной, почти твердой лавы, ее выбрасывание и выдувание паров воды и газов. Но чаще всего происходят смешанные извержения.

Площадные извержения, по-видимому, должны были быть изливающими и смешанными.

В характере извержений большую роль играет вязкость магмы, которая зависит от ее температуры, состава, количества растворенных в ней газообразных веществ и паров воды.

Магмы, богатые магнием и железом (основные), — более горячие, маловязкие, текучие, а магмы, содержащие больше кремния и алюминия (кислые), — менее горячие и более вязкие, труднотекущие.

В процессе извержения, если в извергающейся магме уже находятся кристаллы-вкрапленники, выделившиеся в очаге или в канале вулкана, главную роль играет не химический состав всей магмы, а химический состав остаточной магмы и ее вязкость. Насколько может измениться состав остаточной магмы по отношению к составу всей магмы, можно судить по изменениям химического состава некоторых вулканических пород в ходе извержения.

Порода выдавленного купола вулкана Мон-Пеле содержала 61,65% кремнекислоты, а выделенная из нее стекловатая масса, которая является остаточной магмой (остаточным расплавом), — 72,40%. Одновременно значительно повысилось содержание окиси алюминия. Такие изменения состава остаточной магмы повлияли на увеличение вязкости магмы этого вулкана, каковое в свою очередь отразилось на особом взрывчатом характере извержения, сопровождаемом не излиянием, а выжиманием лавы.

Линейные извержения

Извержение по существу начинается с момента нарушения равновесия между энергией магмы и давлением окружающей магматической очаг среды. Обычно, но не всегда приносят весть на земную поверхность о начале извержения землетрясения, возникающие у магматического очага или в канале. Они происходят за несколько дней и за несколько месяцев. Так, землетрясения у вулкана Парикутина в Мексике в 1943 г. начались на глубинах 35—45 км за 15 дней до извержения; у вулкана Безымянного в 1955 г. на глубинах около 50 км — за 23 дня. Перед извержением же Шивелуча в 1964 г. землетрясения начались за 9,5 месяцев, несколько усилились за 3,5 месяца и особенно усилились за 18 дней до его чрезвычайно сильного извержения.

При подъеме магмы к земной поверхности, на разных глубинах могут происходить взрывы и некоторые другие явления, также вызывающие вулканические землетрясения.

Изливающие лаву. В геологически более древние времена по многим почти параллельным трещинам достаточ-



Трещинный канал вулкана Элдгья
(фото К. Саппера)

но часто наблюдались излияния маловязкой, очень текучей, преимущественно базальтовой, лавы, сопровождаемые изредка небольшими взрывами. Огромные массы лавы, как при наводнениях, затопляли окружающую местность. В результате таких извержений возникали лавовые плато — лавовые покровы.

В некоторых вулканических областях подобные излияния продолжались в течение длительного времени, образовав ряд налегающих друг на друга покровов-пластов мощностью от 1 до 100 м и общей мощностью до 3 км. Площади, занимаемые ими, как выше упоминалось, достигали десятков тысяч, а иногда более одного миллиона квадратных километров. В историческое время подобных затопляющих извержений не отмечалось. Наблюдались лишь значительно меньших размеров.

Типичным линейным извержением было излияние лавы вулканом Элдгья в Исландии. Из трещины длиной 30 км излилось около 9 км³ лавы, покрывшей площадь 693 км². Окончилось извержение взрывом-выбросом последних порций лавы, обнажившим неглубокий в виде длинного рва кратер, в отдельных местах его возникли маленькие конуса.

Гораздо больше сведений об извержении вулкана Лаки в Исландии, которое несколько отличается от предыдущего. Преддверием извержения Лаки были начавшиеся 1 июня 1783 г. землетрясения, которые с небольшими промежутками покоя продолжались до 8 июня. В этот день около 9 час. утра к юго-западу от горы Лаки на протяжении почти 10 км образовалась трещина. Затем со страшным грохотом стали выбрасываться мелкие обломки пород. На следующий день начались мощные излияния очень жидкой базальтовой лавы, сопровождаемые сильным фонтанированием с образованием большого количества тонких нитей из вулканического стекла. Кроме того, происходили выбросы мелкого обломочного вулканического материала (вулканический песок и пыль), образуя в трещине ряд небольших конусов. Извержение продолжалось 50 дней. За это время излилось почти 10 км^3 лавы, покрывшей площадь около 370 км^2 .

29 июля открылась трещина к северо-востоку от горы Лаки и до конца извержения, происшедшего в начале февраля 1784 г., почти вся вулканическая деятельность с излиянием лавы сосредоточилась главным образом в этой трещине. Извержение сопровождалось значительными выделениями кислых газов (HCl , SO_2 и CO_2).

Вдоль всей трещины общей длиной 25 км образовались узкие рвы — грабены с небольшими конусами. Их насчитывалось около 115. Высота только одного конуса достигала 90 м, отдельные возвышались на 40—70 м, большинство же — всего на несколько метров.

За время извержения излилось $12,2 \text{ км}^3$ лавы, захватившей 565 км^2 , вулканического обломочного материала было выброшено $0,3 \text{ км}^3$, который покрыл территорию площадью 6000 км^2 .

Несколько иначе протекали извержения хребтообразного вулкана Гекла в Исландии из трещины длиной 4,5 км. Его извержения в 1947—1948 гг. и в 1970 г. происходили по близко расположенным друг к другу трубоподобным каналам.

Начальные стадии обоих извержений в 1947—1948 гг. после относительно кратковременных землетрясений были очень сильными, исключительно взрывными, затем начались излияния лавы, сопровождаемые взрывами. Лава в первом извержении, объем которой составлял $0,4 \text{ км}^3$, покрыла площадь 18 км^2 , а выброшенный обломочный ма-

териал объемом $0,09 \text{ км}^3$ занял площадь около $70\,000 \text{ км}^2$.

При извержении в 1970 г. вулканические обломки распространились на 6950 км^2 , а мельчайшие обломки-пылинки — на $40\,000 \text{ км}^2$. Весь объем лавы равнялся $0,2 \text{ км}^3$.

Особенностью извержений Геклы является приуроченность их к одной и той же трещине. Его извержения, пожалуй, следует относить к особому, промежуточному (между линейным и центральным) типу извержений.

О лавовых излияниях по трещинам кислых магм, обычно обладающих значительной вязкостью, известно мало. Вязкость их препятствует излиянию вообще, а тем более большими массами. Если же они происходили, то, по видимому, должны были быть особые условия, уменьшающие их вязкость (более высокая температура или повышенное содержание в них летучих соединений — газов).

Одно из линейных извержений кислой лавы произошло в среднем протерозое, т. е. около 1700 млн. лет тому назад (А. А. Бурхаров). Трахилипаритовая лава излилась в Северо-Байкальском нагорье по трещине длиной 25 км, шириной до 300 м и местами покрыла поверхность до 7 и 9 км.

Взрывные извержения. Совсем иной характер носило извержение в Новой Зеландии вулкана Таравера, имевшего вид небольшого хребта, состоящего из ряда соприкасающихся риолитовых куполов.

10 июня 1886 г. в 2 час. 10 мин. возникли разломы в северной, через несколько минут — в средней, а потом — и в южной частях вершины Тараверы, образовав трещину длиной 14,5 км. Затем начался непрерывный грохот, засверкали молнии и посыпался сильный град из раскаленных обломков, шлака, камней и пепла, которые покрыли поверхность Земли пластом мощностью до 10 м. Взрывы обнажили красивые своим контрастным сочетанием цветов кратеры — их белоснежные риолитовые стенки были увенчаны слоем темно-коричневых обломков базальтовых шлака и пепла.

После небольшого затишья в 4 час. утра снова раздались подземные удары и сильный грохот, а недалеко от находившегося вблизи Тараверы озера Ротомахана стали стремительно вырываться клубы пара и массы пепла, окутавшие мраком всю местность. Вскоре подул юго-западный ветер и пошел сильный дождь, который вместе с пеплом образовал густую грязь. Возникшая трещина в



Вулкан Травера (фото Дж. Хили)

одних местах имела вид слившихся друг с другом, а в других — соприкасающихся между собой кратеров.

Шлака и пепла было выброшено 1,269 км³. Совсем не наблюдалось лавовых потоков, хотя лава находилась в канале вулкана. Главная сила извержения заключалась в выделившихся газах, прорвавшихся по трещине. В тех местах, где трещина пересекала озеро, происходило фреатическое извержение, вызванное переходом воды в пар.

К взрывным извержениям кислой магмы по трещинам относят игнимбритовые извержения (в переводе с латинского «игнис» — огонь, «имбер» — ливень). Однако механизм их является еще дискуссионным, так как в ряде вулканических районов они связаны не с типичными трещинами, а скорее с образованием кальдер. Тем не менее многие исследователи считают, что игнимбритовые извержения происходят по центральным каналам и по трещинам, различая трещины прямолинейные, связанные с тектоническими разломами, и криволинейные, связанные с образованием кальдер (причем первые находятся под сомнением).

По мнению одних исследователей раздробленная взрывами на мелкие капли еще высокотемпературная жидкая кислая лава, богатая газами, образует эмульсию в



Ряд кратеров вулкана Таравера

газе с небольшим количеством твердых частиц. Такая масса может «течь», подобно жидкости, в виде (без крупных глыб) пирокластического потока, продвигающегося независимо от рельефа как по долинам, так и по окружающим вершинам и их склонам. В нижней части такого пирокластического потока формируются как бы включения плотного вулканического стекла линзовидной формы (называемые по сходству с контурами пламени от свечи «фьямме»). Их покрывают спекшиеся, а над ними и неспекшиеся рыхлые отложения вулканических обломков.

Другие предположения опираются на очень интересное и довольно редкое явление — извержение прерывистой, или несплошной лавы (Ф. Перрет). Возможность существования такого процесса основывается на наблюдениях У. Гамильтона извержения Везувия в 1773 г. и У. Бриджема — извержения Халемаумау на Гавайях в 1909 г.

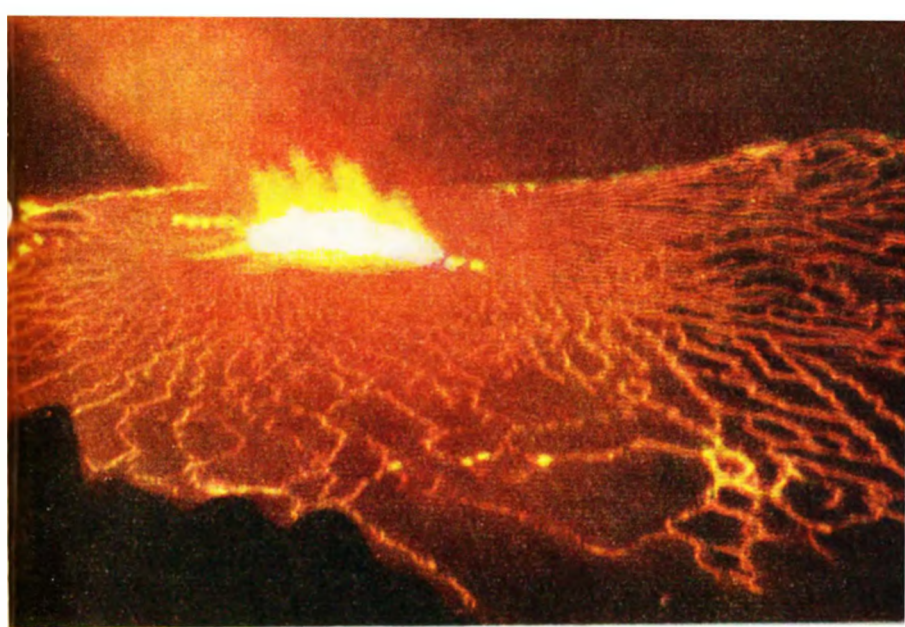
Гамильтон описал это явление следующим образом: «Я часто наблюдал (извержения. — В. В.) на горе Везувий, в то время когда я был вблизи к истоку, откуда извергалась сама лава, состояние которой время от времени изменялось. Я видел ее жидкой и сплошной, по-

добно льющемуся расплавленному стеклу, но я видел ее «мучной», состоящей из отдельных частиц, с какой-то силой отталкивающихся друг от друга, подобно тому, как мука выходит из-под жернова».

Бриджем отмечал, что через вертикальную полукруглой формы плиту из лавы, похожую отчасти на жернова, «падал каскад лавы в состоянии, в котором я никогда не видел. Ее частицы, казалось, находились в состоянии взаимного отталкивания и, хотя находились в раскаленном добела состоянии, падали через центральное отверстие этого «жернова», как мука. Не было видно никакого сцепления частиц, никаких признаков сплошной расплавленной лавы».

По мнению ряда исследователей, трещинные извержения очень богатой газами кислой магмы начинаются со сравнительно небольших взрывов, за которыми следуют один за другим выбросы горячих газов в смеси с очень горячими частицами, находящимися одни в жидком, другие — в пластичном и третьи — в раскаленном твердом состояниях. Эти частицы — капли и обломки лавы — увлекаются выделяющимися из магмы горячими газами и, находясь во взвешенном состоянии, из-за общей их тяжести не выбрасываются, а переваливаются через край трещины. Возникают идущие один за другим потоки газов, переполненных каплями лавы и раскаленными мелкими обломками стекла и кристаллов. В результате образуются платоподобные отложения мощностью от нескольких метров до нескольких сотен. Благодаря очень горячему состоянию материала этих горячих газо-пепловых потоков, а также давлению налегающей толщи в нижних частях отложений обломки спекаются и даже, как считают, могут расплавиться, создавая среди обломков участки с фьямме.

Механизм игнимбритовых извержений сравнивают также с вскипанием молока. Подобные извержения, возможно, могут происходить с кислой магмой, только очень богатой газами. Быстро выделяясь в течение короткого времени, они почти мгновенно превращают магму в очень подвижную пену, могущую быстро течь по земной поверхности. При этом комки более плотной лавы оседают и скапливаются преимущественно в нижних частях потока. Остывая и постепенно отвердевая, пена становится хрупкой и в процессе продолжающегося течения ломает-



Лавовое озеро Килауэа ночью

Подводное извержение Сюртея в 1963 г.



ся на мелкие обломки, которые, смешиваясь с еще жидкой частью потока, образуют упоминавшуюся характерную структуру как бы включений фьямме среди сплавившихся обломков стекла и кристаллов.

Центральные извержения

Центральные извержения из трубоподобных каналов по сравнению с линейными извержениями более разнообразны. В одних преобладают излияния лав без заметного количества или, наоборот, с относительно большим количеством газов, в других — выжимания полутвердой лавы с выбросами различных раскаленных туч, в третьих — взрывы (сопровождающие небольшие излияния или выжимания лав), доходящие почти до чисто газовых извержений. И, наконец, четвертые — смешанные извержения, в которых сочетаются выбросы достаточно жидкой лавы с ее излияниями. Между этими извержениями нет резких и отчетливых границ, и поэтому разделение их на разновидности достаточно условное.

По совокупности некоторых характерных для данных вулканов особенностей их деятельности различают несколько ее типов. Главные из них гавайский, стромболианский, пелейский (купольный), вулканский, которые в свою очередь подразделяются на ряд подтипов.

Извержения базальтовых вулканов Килауэа и Мауна-Лоа на Гавайях и им подобных — Ньярагонго в Африке, Плоского Толбачика на Камчатке и некоторых других — выражаются главным образом в излиянии очень текучей горячей (с температурой около 1200°) лавы. Газы почти не выделяются ни в виде колонны, ни в виде облаков. Они только как бы испаряются, подымаясь над кратерами легкой прозрачной дымкой.

Извержения вулканов Килауэа и Ньярагонго

В кратере возникает огненно-жидкое озеро, лава которого временами фонтанирует на высоту до нескольких сотен метров. Комья лавы, падая на землю почти жидкими, сплавляются в конусоподобные нагромождения. Отдельные комья расплющиваются, образуя вулканические

бомбы, по форме похожие на лепешки с неправильными очертаниями. Временами на озере возникают лавовые пузыри, которые, лопаясь, выбрасывают капли еще очень жидкой лавы. В полете они принимают формы стеклянных слез и нитей, называемых по имени богини огня у древних жителей Гавайских островов волосами Пеле.

Необычная форма фонтанирования наблюдалась в 1969 г. во время извержения Мауна-Улу, расположенного на восточном склоне Килауза. Изливавшаяся лава приняла гладкую форму купола, достигавшего в высоту 25 м. Питание лавой и сохранение куполоподобной формы происходили за счет непрерывного притока лавы по подземному каналу из расположенного выше кратера Алае. Лава подымалась подобно воде, изливающейся самотеком из артезианских колодцев.

Извержение Килауза с огненным озером лавы началось в 1823 г. и протекало с двумя небольшими перерывами до 1924 г., когда после сильного фреатического извержения оно прекратилось.

В 1948 г. было обнаружено подобное лавовое озеро у вулкана Ньирагонго, которое во всяком случае до 1960 г. еще существовало. Оно описано Г. Тазиевым. «Мы готовы были часами любоваться этим волшебным озером. И чем ближе мы к нему подходили, тем более захватывающим было это сказочное зрелище... Тяжелые волны жидкой лавы глухо ревели и бились (о стенку кратера.— В. В.) ...Из двух раскаленных расщелин с оглушительным шумом, задыхаясь от одышки, вырывались горячие газы. Температура их достигала 1000°. В десяти шагах от стены мы остановились. Под нами klokотала — до нее было не больше четырех метров — расплавленная лава. Жара была невыносимой, выдержать ее более 8—10 секунд кряду было невозможно.

Течение, то медленное, то быстрое, увлекало лаву по направлению к гроту, расположенному на южном конце озера. С шумом врывалась лава в широкую огненную пасть и здесь исчезала; лава была подобна жидкому золоту, кипящему в огромном котле.

Брызги фонтанов, имевшие температуру 1100°, сталактиты цвета спелой вишни, свисающие со свода раскаленной пещеры; ритмичная зыбь, порой, как в лихорадке, сотрясавшая тяжелую жидкость, наконец, тяжелые валы огненного прибоя.



Артезианоподобное извержение вулкана Мауна-Улу в 1969 г.
Высота «купола» 15 м (фото Д. А. Свенсона)

Были и иные проявления кипучей деятельности, которая шла в недрах Земли, проявления, более скрытые, более неуловимые, но столь же чарующие. Таковой, например, была пленка, которая набегала на поверхность лавы, когда она начинала остывать. Газы, которые подымались из глубины, давили снизу на эту прозрачную кожу, отливающую всеми цветами радуги; эти газы вскипали под ней, образуя пузыри, которые затем рассасывались; порой, однако, газы прорывали упругую оболочку, которая преграждала им путь к свободе. Не меньший интерес вызывало и другое явление: порой расплавленная масса приходила в движение, и внезапные приливы и отливы то поднимали, то опускали уровень озера на несколько метров. Иногда обломки затвердевшей скорлупы уносились течением и терялись в огненном море...

Происходили различные движения жидкой магмы, то медленные, то быстрые, ритмические или спорадические»¹.

Часто извержение подобных вулканов ограничивается только образованием лавового озера. В тех же случаях, когда лавы выделяется много, она льется быстрым пото-

¹ Г. Тазиев. Вулканы. М., ИЛ, 1963, стр. 110—111.

ком по крутому склону вулкана и значительно медленнее — по пологому. Она изливается и через боковые кратеры, образующиеся на склонах вулкана.

Остывая, лавовый поток покрывается корочкой, форма которой определяется вязкостью лавы, содержанием в ней газов, углом наклона склона и скоростью охлаждения. В зависимости от химического состава лавы и содержания в ней газов переход ее из жидкого состояния в твердое происходит в пределах $900-600^{\circ}\text{C}$. Остывание лавового потока неравномерно по всей его толщине, вследствие чего само течение идет как бы послойно. Верхний слой застывает быстрее. При очень замедленном движении потока лава, еще довольно быстро текущая под верхним слоем, сдавливает уже возникшую на поверхности корочку. Образуются небольшие складки, похожие на волны, канаты и т. д., а сама лава переполняется пузырьками сфероидальной формы, указывающими на ее малую вязкость и на равновесие давления, создаваемого в пузырьках газами с всесторонним давлением на них самой лавы. Такую поверхность лавового потока называют волнистой, или на полинезийском языке «пахойхой».

Лавовый поток продолжает течь, из лавы выделяются, точнее испаряются, газы, и несколько понижается ее температура. Лава становится слегка более вязкой. При ее отвердевании образуется очень пузыристая шлаковая корка с неправильными формами пор и пузырьков, которая при продолжающемся движении потока разламывается на куски с неровными, зазубренными поверхностями, похожие на зерна гречневой крупы, конечно, увеличенные в сотни раз. Такую лаву принято называть обломочной, или по-полинезийски «аа» лавой.

Извержения вулкана Стромболи

Деятельность вулканов Стромболи в Италии и ему подобных, обладающих несколько более вязкой, с большим содержанием газов, но все еще горячей (температура около 1150°) и хорошо текучей лавой отличается от гавайского типа вулканов некоторыми особенностями.

Стромболи действует несколько тысячелетий почти без перерывов. Кратер этого вулкана представляет собой не чашу или воронку, а террасу-площадку, достигающую в

Стромболианский тип
извержения Этны в 1910 г.
(фото Ф. Перрета)



поперечнике сотен метров и окаймленную с восточной стороны стеной высотой до 100 м. Бомбы и глыбы лавы, падавшие обратно в кратер в результате взрывов, и создали в нем эту площадку-крышу. Сквозь трещинки в ней вырываются очень горячие газы, а из жерл с удивительным постоянством — через промежутки от нескольких минут до получаса — происходят взрывы. С глухим ревом вместе с газами обычно белого цвета выбрасываются куски раскаленного шлака и комья жидкой лавы — бомбы, принимающие в полете форму веретена, груши и различных причудливых очертаний. Силой взрыва они поднимаются на высоту 50—300 м, очень редко — до 3000 м. Подобное сильное извержение Стромболи отмечалось в 1930 г., а с начала XV в. их произошло всего 7 (обильных излияний лавы было мало).

Чаще всего происходят более или менее «обычные» извержения Стромболи, одно из которых было заснято на кинолентку и затем красочно описано Г. Тазиевым.

«Грохот раздался одновременно с мощной вспышкой света... Вулкан выбрасывал лаву в направлении на северо-восток. Узкий огненный султан озарил южное небо. Затем он угас, и тотчас же посыпались бомбы... Падали, мгновенно расплющиваясь, огромные красные комья... Колыхалась в жуткой трясине тяжелая огненная жидкость.

Легкая зыбь пробегала на этой медно-золотистой поверхности. Иногда огромный пузырь газа взрывал эту беспокойную гладь. Разбрызгивая искры, она тяжело билась о стенки огненного колодца... Питающее жерло, диаметром 12—15 м, по форме скорее напоминало глаз, чем круг... Из жерла, словно из горна... вырывался удушливый жар. Рыжеватый дым, подсвеченный этой адской печью, курился над kloкочущей лавой и вихрился в жерле, то скрывая, то обнажая ее огненное дно... Послышался рокот и вспыхнул яркий свет... Затем толчок, за ним моментально оглушительный взрыв... Раскаленные глыбы мягкого вязкого вещества с глухими ударами обрушились на северо-восточную стенку жерла... Это был звездопад, причем с чрезвычайной быстротой вишневые сполохи сменялись гранатовыми, а минуту спустя поверхностная корка угасила весь этот огненный фейерверк»¹.

Извержение Ключевского вулкана и его бокового конуса Билюкай

Камчатский Ключевской вулкан — самый высокий (около 4850 м) действующий вулкан Евразии. За последние 275 лет произошло 38 циклов извержений. Чаще всего они начинаются взрывами из главного кратера, находящегося на самой его вершине, и излияниями сравнительно небольших лавовых потоков. Затем на склоне вулкана по радиусу от вершины прорывается ряд боковых кратеров. Такая смена мест извержений наблюдалась, например, в 1937—1939 гг. и в 1944—1945 гг. Первые предвестники извержения 1937—1939 гг. наблюдались значительно раньше, с апреля 1935 г., когда начинались интенсивные выделения из главного кратера газов, иногда со слабыми взрывами. Их сменили выбросы пепла и газов на высоту до 4 км, затем — раскаленных обломков и глыб. Наконец, в ноябре 1936 г. зарево над вершиной вулкана уже свидетельствовало о подходе огненной лавы к кратеру вулкана. В течение 1937 г., начиная с апреля, наблюдалось около 50 извержений, из которых половина были чисто взрывными, а другая половина — взрывные и изливающие лаву. В начале февраля 1938 г. на восточном

¹ Г. Тазиев. Встречи с дьяволом. М., ИЛ, 1961, стр. 98—100.

склоне Ключевского вулкана на высотах 1800—900 м на протяжении почти 7 км возникли пять боковых кратеров и несколько воронок взрыва. В верхних кратерах происходили взрывы, в нижних — излияния лавы, но вскоре вся деятельность сосредоточилась в самом нижнем кратере Билюкае и продолжалась 390 дней.

Извержения Билюкая изучались С. И. Набоко, В. Ф. Попковым и И. З. Ивановым. О них довольно подробно рассказано в специальной литературе, но на некоторых событиях, связанных с более глубоким познанием вулканической деятельности, следует остановиться особо, так как у нас, кроме статьи-отчета В. Ф. Попкова, о них ничего не написано. Г. Тазиев, например, в своих книгах посвящал целые главы поразительному дрейфу на корке огненнодышащей лавы, совершенному научными сотрудниками Камчатской вулканологической станции геологом В. Ф. Попковым и химиком И. З. Ивановым. Кто знает, может быть, именно этот дрейф, а также посещение Попковым действующего кратера Билюкая явились для Тазиева примером тех героических подвигов, которые он впоследствии совершил с целью познания вулканической деятельности.

Излияние лавы вулкана Мауна-Лоа в 1935 г. и образование волнистой лавы — пахойхой (фото Т. Джаггара)



Для определения температур лавового потока Билуюка и состава выделяющихся из него газов была сделана попытка произвести определения температуры и сбора газов на самом лавовом потоке. Вот как описывает эту операцию, проведенную 2 ноября 1938 г., сам Попков: «В 600—650 м от истока поверхность раскаленного потока была покрыта темной шлаковой растрескавшейся коркой толщиной в 30—40 см с остроконечными выступами около 50 см над поверхностью.

Черная шлаковая корка была обрамлена кругом потока каймой расплавленной лавы. Корка непрерывно двигалась вместе с потоком, вначале со скоростью 42 м, а затем 32—30 м в 1 мин. В средней части потока с ее поверхности интенсивно поднимались струи газа.

От края корки нас отделяла двухметровая полоса лавы красного свечения. Она легко протыкалась металлическим стержнем, и в нее можно было без особого труда погрузить конец термопары для того, чтобы измерить температуру лавы. Однако от этой попытки пришлось отказаться, так как движущийся поток мог поломать термопару, а идти по течению потока и держать в руках термопару с включенным гальванометром не позволяли температурные условия и рельеф берега русла. Тем не менее было крайне желательно произвести измерение температуры лавы. Явилась мысль — перескочить для этого через раскаленную кайму на темную корку. Кроме измерения температуры было также интересно взять пробу газов из расплавленной лавы. Брошенная значительная по весу глыба остывшей лавы на раскаленную докрасна кайму убедила нас в достаточной ее прочности, способной выдержать вес человека. Что же касается застывшей плотной корки лавы, то брошенные на поверхность камни издавали звон бьющегося стекла. После этого с большой осторожностью я вступил одной ногой, обутой в асбестовую обувь, на раскаленную лаву, не бросая руки И. З. Иванова. Почувствовав достаточное сопротивление ее поверхности, я отпустил руку своего спутника и еще раз шагнул, перенеся при этом часть веса своего тела на жезл, который от такого давления медленно погрузился в еще пластичное вещество раскаленной лавы. Еще шаг, и я вступил на потемневшую плывущую корку лавы, а за мной последовал и мой химик со своей лабораторией. Горячие токи воздуха с небольшой концентрацией

хлористого водорода, исходящие от поверхности раскаленной лавы, быстро сносились холодным северо-западным ветром. Этот дрейф на лаве дал нам возможность измерить температуру лавы в нескольких точках и взять пробы газов.

Заметив время и место погрузки, мы приступили к работе. Проткнув жезлом лаву цвета красного каления на глубину 40 см у края темной корки, мы погрузили термопару и присоединили ее проводниками к гальванометру. Стрелка гальванометра быстро скользнула по шкале до деления 400°C , а затем непрерывно передвигалась, пройдя 500, 600, 700 и 800°C деления шкалы. Через деление 870° стрелка не переступала, причем происходило колебание стрелки гальванометра в пределах $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$ в сторону уменьшения. Повторное измерение снова дало максимальную температуру лавы 870°C и минимальную при этом же измерении 860°C .

Поток непрерывно двигался к востоку—северо-востоку всей своей массой, равномерно, без рывков. Случайно оставленные обрывки асбестового листа на поверхности красной лавы отстали от нас примерно на 1 м. Это явление объясняется, по-видимому, торможением расплавленного лавового потока у края русла. В движущейся расплавленной лаве количество газовых пузырей в более удаленных частях потока было меньше, чем в местах, расположенных ближе к лавовому жерлу.

Наконец, мы приступили к взятию проб газов из горячего потока. Взять пробы газов из пузырей нам не удавалось. Несколько проб газов были неудачными потому, что каждый раз накрытый воронкой пузырь лопался не внутри ее, а сбоку, и, следовательно, газы уходили непосредственно в воздух. Тогда мы сделали углубление в верхнем слое лавы и, применив асбестовую воронку нужного диаметра с фарфоровой трубкой, прососали несколько литров газа. Включенная термопара, погруженная в расплавленную массу на глубину 45 см, определила температуру лавы 800°C с последующим отклонением стрелки гальванометра вниз на 5°C .

Анализ газовой смеси, выполненный и опубликованный химиком И. З. Ивановым, дал следующие результаты: H_2O — 1000 мг на литр газа, HCl — 0,5%, O_2 — 21%, N_2 и др. — 78,5% (по-видимому, был захвачен и воздух.— В. В.). Наличие водяных паров в пробе га-

зов, взятой непосредственно с верхнего слоя расплавленной лавы, указывает на то, что вода в данном случае, вероятно, является продуктом реакции в расплавленной лаве. Следует отметить и другое обстоятельство, а именно, что ни на горячем потоке, ни по краевой части темной корки в это время не образовались возгоны.

Собрать образцы лавы с горячего потока представляло некоторые трудности. Образцы пластичной лавы легко отделялись от общей массы, но переместить их на поверхность темной корки было трудно, так как отделенный кусок лавы легко спаивался с поверхностью горячего потока, пока образец не приобретал твердую корочку в результате неоднократного его поворачивания.

Долго стоять на горячей движущейся корке, температура которой у поверхности была $270-300^{\circ}\text{C}$, а в трещинах имела темно-красное каление, было опасно, почему нам неоднократно приходилось взбираться на угловатые выступы на темной корке, чтобы дать ветру несколько охладить ноги, обутые в асбестовые ботинки. Во время нашей работы у края темной корки мы подстилали листовой асбест, и все-таки нам приходилось часто еще стоять, подобно аистам, на одной ноге, чтобы дать возможность другой остыть на ветру.

На расстоянии 3000 м от центра излияния поток двигался по склону в $5-7^{\circ}$ и уже со значительно меньшей скоростью. Лава краевой зоны была пластичной еще при температуре 690°C . На темной корке мы пробыли один час. Вместе с потоком мы проплыли от своей первоначальной точки на восток-северо-восток более 2000 м, где благополучно сошли на уже остывший поток»¹.

Так прошел замечательный дрейф по огненно-жидкой лаве, а 16 января 1939 г. В. Ф. Попков вместе с рабочим станции С. П. Романовым посетили активно действовавший основной кратер Билюкая.

«Чем ближе мы подходили к арене извержения,— пишет В. Ф. Попков,— тем грознее слышался грохот, дрожала почва, сыпалось большое количество вулканического песка и пыли. Редкие раскаленные бомбы стремительно катились вниз по северному и восточному склонам конуса Билюкая к его подножию, оставляя бороздки на

¹ В. Ф. Попков. О деятельности Билюкая в 1938—1939 гг.— «Бюлл. Вулк. станции на Камчатке», 1946, № 12, стр. 34—36.

склоне конуса... Непосредственно вслед за сильным подземным гулом ощущалось дрожание почвы...»¹

Количество взрывов колебалось в пределах от 21 до 33 в минуту, из которых почти половина сопровождалась выбросом большого количества вулканических бомб. Большинство их падало в восточном и юго-восточном направлениях, поэтому Попков и Романов решили взобраться на край кратера с противоположной стороны. В 100 м от края кратера стали ощущаться сильные сотрясения конуса, почти непрерывно повторяющиеся одно за другим. В такой обстановке с частыми взрывами-выбросами они достигли северо-западного края кратера. Взрывы были такой силы, что приходилось кричать или пояснять жестами дальнейший план действий. По их определениям, диаметр кратера был около 50 м, а края кратера возвышались от 3 до 8 м над его дном. Внутрикратерные склоны полого наклонены к жерлу. Местами у краев кратера из фумарол струился водяной пар, насыщенный HCl. Как отмечает Попков, «наносимые ветром газобразные выделения из фумарол раздражали слизистую оболочку носа и гортани, заставляя нас чихать и кашлять. Газы, насыщавшие окружающий нас в кратере воздух, сильно действовали и на глаза, вызывая мучительную резь, сопровождавшуюся слезотечением. Опасаясь этой концентрации, мы выбегали на более открытое место — на гребень кратера»².

Дно кратера представляло собой относительно ровную площадку диаметром около 30 м, что дало возможность спуститься в него и подойти к жерлу на расстояние 8—10 м. Жерло было расположено ближе к юго-восточной стенке кратера. Оно представляло собой небольшое отверстие 3,5 на 2,5 м. «Для того чтобы узнать строение стенок жерла, его температуру, наличие или отсутствие раскаленной лавы в самом жерле, мы несколько раз быстро подбегали к жерлу и заглядывали в огненную пасть Билюкая. Юго-западный и северо-восточный края жерла имели зазубренную форму.

В интервалах между сильными взрывами мы ухитрились несколько раз подбегать к краю жерла. С. П. Романову удавалось быть у жерла в расстоянии 0,5—0,6 м,

¹ В. Ф. Попков. О деятельности Билюкая в 1938—1939 гг., стр. 38.

² Там же, стр. 46.

мне же — не менее чем в 1 м. Близко от края жерла ощущался такой сильный жар, что приходилось защищать свои лица рукавицами, а уши и шею племами.

Жерло представляло собой уходящую далеко вглубь трубу. Стенки канала были раскалены до ярко-красного свечения с желтым оттенком, что, должно быть, отвечает температуре примерно в 1000°C . Сам канал был наклонен на $10\text{--}12^{\circ}$ к востоку—юго-востоку; этим объясняется наблюдавшееся отклонение большинства бомб к юго-востоку... Стенки жерла были блестящими, с неглубоко гофрированной поверхностью. Такая структура стенок жерла, по-видимому, объясняется быстро движущимися по каналу вулканическими продуктами, доставляемыми на поверхность из вулканического очага. Стенки канала были покрыты пластичной раскаленной стекловатой глазурью. Выбрасываемые большие куски лавы, не достигавшие поверхности кратера, прилипали к стенкам раскаленного жерла, держались на них доли секунды, затем часть массы отрывалась и падала вниз, а часть крупной струей стекала по стенке канала. В других случаях было заметно только прилипание к стенкам жерла бесформенных кусков лавы, сопровождавшееся незначительным ее разбрызгиванием, причем и эти висящие куски расплавленной массы быстро отрывались, увлекая за собой небольшие количества пластичной массы с поверхности стенок и оставляя на них следы раковиднообразных углублений. Этим явлением, наблюдавшимся в юго-западной и северо-восточной частях жерла, объясняется, вероятно, наличие углублений и бугристости на соответствующих его стенках.

В кратере мы чувствовали себя весьма напряженно. Надо было остерегаться почти непрерывно падающих шлаковых раскаленных бомб и обломков. Из них процентов 30 падало в чашу кратера, процентов 50 — на поверхность конуса, причем ложились они больше на восточный и юго-восточный склоны его, и остальная часть падала за пределами конуса. Бомбы имели красное свечение ($700\text{--}795^{\circ}\text{C}$) и обладали такой пластичностью, что погруженная в них монета быстро приобретала такую же окраску и оставалась незаметной до остывания и почернения лавы. В другом образце из погруженной пули через несколько секунд выплавился свинец и заполнил поры. За последние 15 мин. нашего пребывания в кратере было

зарегистрировано 232 сильных взрыва, не учитывая слабых выбросов, похожих на выдох, сопровождавшихся шипящими или свистящими звуками. Интервалы между сильными взрывами были непостоянны и колебались в пределах от 3 до 5 сек.

Закончив наблюдения и сбор каменного материала в кратере, мы благополучно спустились к подножию конуса. При спуске мы еще подверглись обстрелу обломками лавы, летевшими вниз по склону. Эти обломки лавы часто ударялись о лежавшие плотные камни и со свистом пролетали мимо нас. Наше платье, лица, уши были покрыты мелким вулканическим пеплом и пылью»¹.

Извержения Авачинского вулкана

С начала XVIII в. произошло 13 извержений Авачинского вулкана на Камчатке (последние в 1938 и 1945 гг.).

Извержению 1938 г. предшествовало постепенное увеличение выделений газа из кратера. Затем над ним стало появляться огненно-красное зарево. Первое извержение произошло 6 марта. Сильные непрерывные взрывы. Выбросы раскаленных глыб, падавших на склоны вулкана и катившиеся вниз горячими лавинами. Частые вспышки линейных, сплошных и шаровых молний. Извержение продолжалось 9 час.

Новое извержение началось 28 марта и длилось сутки. Оно было более сильным. Взрывы выбрасывали большие массы пепла и глыб, которые, упав на снег, образовали грязевый поток длиной 18 км. В этот же день излилась и лава в виде языка длиной 70 м.

Следующее извержение зарегистрировано 20—21 апреля. Происходили только частые (через 3—6—10 сек.) взрывы, выбрасывавшие пепел. Во время извержения 4 сентября наблюдались редкие взрывы, выбрасывавшие пепел и раскаленные глыбы лавы, которые катились подпрыгивая по склону вулкана. Длина потока лавы достигла 1 км. Последняя вспышка отмечалась 27 ноября.

Извержение Авачинского вулкана в 1945 г. началось внезапно 25 февраля в 14 час. 45 мин. «с одиночного, — как описывал Б. И. Пийп, — очень сильного взрыва, в ре-

¹ В. Ф. Попков. О деятельности Билиюка в 1938—1939 гг., стр. 46—48.

зультате которого над кратером поднялась темно-серая сфероидальной формы плотная масса газов и пепла. Последняя, быстро поднимаясь вверх и одновременно расширяясь, вскоре приняла форму гриба, соединенного с кратером тонкой шейкой пепла. Примерно через 5 мин. произошел второй такой же взрыв». Затем через несколько минут — третий. Взрывы следовали один за другим со всевозрастающей силой, а подымавшееся облако газов и пепла приняло форму кочана цветной капусты.

Приблизительно через 45 мин. после первого взрыва засверкали молнии. Наибольшей силы извержение достигло к 18 час; через час оно ослабло. Туча протянулась к этому времени на 50—60 км в сторону от вулкана. Падавший из нее горячий пепел образовал обширную завесу и вместе с раскаленными обломками лавы вызвал таяние снега и льда вблизи кратера. Выброшенные в результате взрывов бомбы имели растрескавшуюся поверхность, какая иногда бывает на корке хлеба. Извержение продолжалось около 7 час.

Во время максимального пеплопада в 20 км от кратера за минуту наполнялась целая пригоршня пепла. Среди падавших обломков преобладал крупный песок и отчасти лапилли — обломки лавы размерами от 0,5 до 1 см в поперечнике, отдельные обломки достигали 10 см и очень редко 20—25 см. Объем выброшенного Авачей вулканического обломочного материала составил 0,25 км³.

В этой зоне пеплопада еще до заката солнца наступила абсолютная мгла и люди двигались наощупь. Наблюдались резко выраженные явления тихого электрического разряда (так называемых огней Эльма) бледно-синеватого цвета, похожего на горящий спирт. Он концентрировался на заостренных предметах и становился видимым при движении. Были видны траектории падавших предметов, взмахи руки и т. д. В воздухе, кроме того, ясно ощущался запах сернистых газов. Концентрация их была небольшой. Людям и крупным животным они не причинили вреда, но малые птицы и полевые мыши погибли в большом количестве.

Извержения вулкана Шивелуча

Извержение самого северного на Камчатке действующего вулкана Шивелуча началось, по описанию А. А. Меньшилова, в конце 1944 г. прорывом лавы сквозь ранее образовавшийся купол. Напором раскаленной лавы он был разломан, и его гигантские глыбы отброшены в стороны. Вплоть до 1950 г. и особенно в 1946—1948 гг. временами появлялась раскаленная почти твердая лава, образуя скалы и формируя новый купол. Она затвердевала еще в жерле и на выходе из него была огненно-красной с температурой около 900—930°.

Выжимание лавы иногда сопровождалось стелящимися раскаленными тучами. В результате наклонно направленных взрывов из жерла вулкана выбрасывались огромные массы сжатых газов и горячих обломков — от мельчайших до крупных глыб размерами около 10 м в поперечнике. Некоторые из выброшенных глыб от уменьшения давления и расширения заключенных в них газов самовзрывались. Вся эта масса газов, пепла, более крупных обломков и глыб, двигаясь без особого шума по склону вулкана со средней скоростью 25 м в секунду, расширялась и подымалась ввысь, образуя грозную темную тучу. Таких туч длиной от 0,5 до 5 км в этом цикле извержений Шивелуча было несколько.

В результате многократных выжиманий лавы со средней скоростью 0,5 м в сутки сформировался скалистый купол высотой от 500 до 600 м, с диаметрами основания его около 1000 м, а вершины — около 500 м. По трещинам в нем со скоростью 1—15 м в сутки на высоту 50—100 м выталкивались отдельные «иглообразные» глыбы, называемые обелисками.

Кроме того, во время извержения горячие глыбы лавы срывались с крутых краев купола лавинами длиной 0,5—4,5 км и движимые силой тяжести скатывались с грохотом, увлекая за собой лежащие на склоне обломки лав и подымая серое облако пыли. Когда же горячие обломки и пепел падали на снег, он таял, смешивался с ним и создавался грязевой поток.

Иного характера было извержение Шивелуча 12 ноября 1964 г. Оно началось в 7 час. 07 мин. по местному времени. Вначале появилось белое клубящееся облако, а в западной части кратера взвился узкий столб пламе-

ни. Вслед за ним прорвалась огромная грибовидной формы черная туча, поднимавшаяся на высоту 11—12 км и ставшая в своей верхней части светло-серой. Яркие и очень широкие молнии сверкали, прорезая тучу от центра к ее краям, а в нижних частях тучи при вспышках молнии наблюдались красные сполохи.

К 8 час. молнии и огненные вспышки уменьшились, а грибообразная колонна с шапкой превратилась в бесформенное темное облако, закрывшее почти весь небосвод. В то же время взрывы, сопровождаемые непрерывным треском и грохотом, разрушили и выбросили расположенные на кратерной вершине Шивелуча пять куполов, в том числе и образовавшийся в 1944—1950 гг. На их месте возникла большая воронка-кратер размерами $3 \times 1,5$ км.

Из нового кратера было выброшено много пепла, а направленные в южную сторону взрывы образовали агломератовый покров и несколько пирокластических потоков длиной около 10 км, перекрывших овраги и выровнявших рельеф на площади 98 км². Волны направленных взрывов были настолько сильны, что ими были сломаны и повалены деревья в лесу, расположенном к югу от южного края пирокластических потоков.

Извержение длилось всего 70 мин. За это время было выброшено около 1,5 км³ вулканического обломочного материала.

Извержения вулкана Усу

После продолжительных (более месяца) землетрясений и ряда сильных толчков в феврале 1944 г. стала подниматься часть пологого склона вулкана Усу, находящегося на острове Хоккайдо в Японии. Примерно через полгода из последовательно возникших по полукругу семи небольших кратеров начались взрывы паров воды, выбросы пепла и грязи, частично связанные с нагревом поднимающейся огненной лавой почвенных вод. Некоторые извержения были достаточно сильными, сопровождались значительным пеплопадом, иногда горячими лавинами. Такого рода извержения продолжались до ноября. За это время участок склона, радиус которого равнялся 2 км, поднялся на 10—15 м, а его средняя часть радиусом 1 км — до 60 м.



Скрытый купол Сиова-Синзана (фото Т. Миллам)

В ноябре на площади около 100 000 м² прорвалась почти твердая, достаточно раскристаллизованная и обильная вкрапленниками дацитовая лава. Процесс прорыва и дальнейшего выталкивания еще раскаленной с температурой около 900° лавы наблюдался до сентября 1945 г. В результате был постепенно выдавлен своего рода острый купол, или крупный обелиск высотой 110 м (а с учетом подъема окружающей местности — около 170 м), названным Сиова-Синзаном, вершина которого была частично увенчана прорванными породами — глиной и туфом.

Гидротермальные извержения

Особой разновидностью извержений являются гидротермальные, происходящие, по мнению американских геологов, в результате скопления в близповерхностных породах под давлением воды и ее нагрева. Достигнув температуры около 250°, вода превращается в пар, и происходит взрыв, напоминающий фреатическое извержение. Новозеландские же геологи считают, что подобные взрывы связаны с вулканическими или тектоническими явлениями.



Варыв вулкана Безымянного 30 марта 1956 г. Высота эруптивного облака около 45 км над уровнем моря (фото Н. В. Ерова)

Такие извержения выбрасывают с парами воды измененные под воздействием вулканических газов и горячей воды породы, поэтому извержения и называются гидротермальными. В Йеллоустонском парке (США) находится не менее 10 кратеров диаметром от метра до 1,5 км, образовавшихся в результате гидротермальных извержений. Подобные извержения происходили в 1886 и 1917 гг. в Новой Зеландии.

Различные типы извержений

Извержения перечисленных вулканов относятся к различным типам вулканической деятельности: Лаки — к исландскому типу, Килауэа и Ньирагонго — к гавайскому, Стромболи и Билукая — к стромболианскому, оба извержения Авачинского — к вулканическому, Шивелуча в 1944—1950 гг. — к купольному, Сиова-Синзана — к скрытокупольному и Шивелуча в 1964 г. — к ультравулканическому типу направленного взрыва.

Одним из главных факторов, влияющих на характер вулканических извержений, являются количественные со-

отношения извергаемых лав и газов. Они выражаются объемами излившейся лавы и выброшенного обломочного материала.

Так, вулкан Килауэа за последние 200 лет излил около $3,4 \text{ км}^3$ базальтовой лавы, примерно такое же количество с 1843 по 1950 г. — вулкан Мауна-Лоа, а обломочного материала было выброшено каждым меньше 1% от объема излившихся лав. Во время извержения Лаки, наиболее обильного лавой, было выброшено около 2,4% рыхлого материала, Билюкаем — 6% базальтовых обломков, Геклой — 18% андезито-базальтовых, Везувием в 1944 г. — 25% лейцитовый породы, Парикутин — 65% андезитовых, Карымским (Камчатка) в 1962—1965 гг. — около 83% обломков андезито-дацитовый лавы. Извержения Авачи в 1945 и Шивелуча в 1964 г. дали 100% обломочного материала, андезито-базальтового состава у первого и андезитового — у второго. Извержением риолитового вулкана Таравера было вынесено также 100% обломочного материала, но не риолитового, а базальтового состава.

Вулканический тип извержения Карымского вулкана (фото Н. В. Огородова



На характер и процесс извержения, как уже упоминалось, влияет вязкость или обратная ей величина — текучесть лавы, которая зависит, как известно, от ее состава и температуры. Основные лавы чаще всего являются более горячими и более текучими, чем лавы среднего и кислого составов.

По имеющимся данным, между вязкостью лавы, ее температурой и типом вулканических извержений существует некоторая закономерность. При извержениях основных лав гавайского типа, имеющих начальную температуру $1200\text{--}1100^\circ$, коэффициент вязкости около $10^3\text{--}10^4$ пуаз, т. е. она очень текучая; стромболианского типа при $1150\text{--}1050^\circ$ — около $10^4\text{--}10^5$ пуаз, т. е. достаточно текучая; во время извержений вулканского типа (лавы среднего состава с температурой $1050\text{--}950^\circ$) коэффициент вязкости — около $10^5\text{--}10^6$ пуаз, лава менее текучая; при извержениях купольного типа (лавы среднего и кислого составов в пределах $950\text{--}900^\circ$) вязкость $10^8\text{--}10^{10}$ пуаз, т. е. лава почти не текучая.

Вулканическая деятельность по совокупности ряда признаков разделяется на типы. Однако извержения вул-

Обелиск (фото А. Лякруа)





Купол Новый вулкана Безымянного (фото Г. Е. Богоявленской)

канов, относящиеся даже к одному типу, не являются точной копией извержения, принятого за образец.

Так, например, извержение купольного типа вулкана Пеле в 1902 г. отличается от описанного того же типа извержения Шивелуча в 1944—1950 гг. выжиманием более крупного высотой около 350 м обелиска, более высокой начальной температурой (около 800°) раскаленных туч и скоростью их движения до 150 м/сек, причем наклон выброса тучи был обусловлен, по-видимому, изгибом жерла или завалом у выхода крупными глыбами лавы.

Извержение вулкана Безымянного на Камчатке в 1956 г. отличалось чрезвычайно сильным направленным взрывом, вырвавшим вершину и часть стенки кратера и поднявшим пепел на высоту около 45 км. Направленность движения раскаленной тучи скорее всего связана с разрушением при взрыве части кратера, вероятно, менее крепкой по сравнению с остальными частями кратера.

Извержение вулкана Катмай на Аляске в 1912 г. также являлось направленным. В течение 60 час. было выброшено около 13 км^3 обломочного материала, температура которого значительно превышала температуру пеплов Пеле и Безымянного, благодаря этому осевшие обломки могли еще сплавляться.

Подводные извержения

На характер подводных извержений влияет глубина моря, где находятся трубоподобные или трещинные вулканические каналы. На больших глубинах моря, в области огромных давлений, создаваемых налегающей водой, извержения бедной газами базальтовой магмы происходят равномерно, «спокойно», без взрывов и без значительного взаимодействия изливающейся лавы с водой. Как только лава войдет в контакт с водой или с относительно рыхлыми осадками, тотчас же охладится ее поверхностный слой и образуется корочка из стекла, как у волнистой лавы. Под корочкой, ставшей тепловым изолятором, продолжает течь лава. Постепенно охлаждаясь, она кристаллизуется и превращается в микрокристаллическую породу.

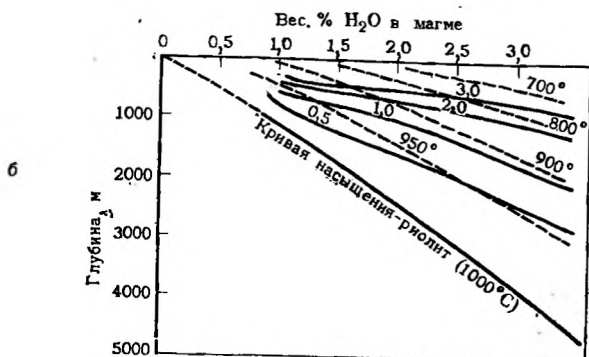
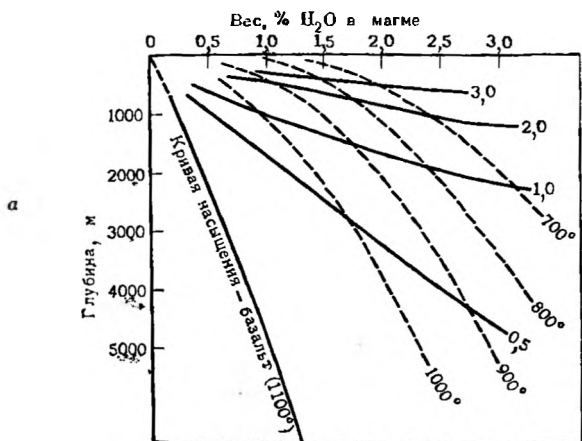
При порывистом, но без особых взрывов излиянии из расположенного на больших глубинах канала подводного вулкана лава соприкасается с нескольких сторон с холодной водой и быстро охлаждается. Вязкость ее очень быстро увеличивается и гораздо быстрее на поверхностях, чем в сердцевинах. Возникающие в лаве напряжения и сокращения дробят ее на обломки, которые и накапливаются около канала подводного вулкана и на его склонах.

Взрывные подводные извержения, по А. Р. Мак-Бирнею, могут происходить тогда, когда объем образующихся в лаве пузырьков достигнет половины объема, занимаемого жидкой лавой (т. е. когда отношение их объемов равно 0,5). При содержании в базальтовой лаве с температурой 1000° около 1,7 вес. % воды максимальная глубина, на которой возникают взрывные извержения, — около 2800 м, а при содержании в лаве с температурой 900° около 2,7 вес. % воды — на глубине около 4200 м.

Максимальная глубина подводных извержений кислой риолитовой лавы при таком же отношении объема газов к объему жидкой лавы и при содержании в ней около 2,7 вес. % воды и температуре 950° — около 2000 м.

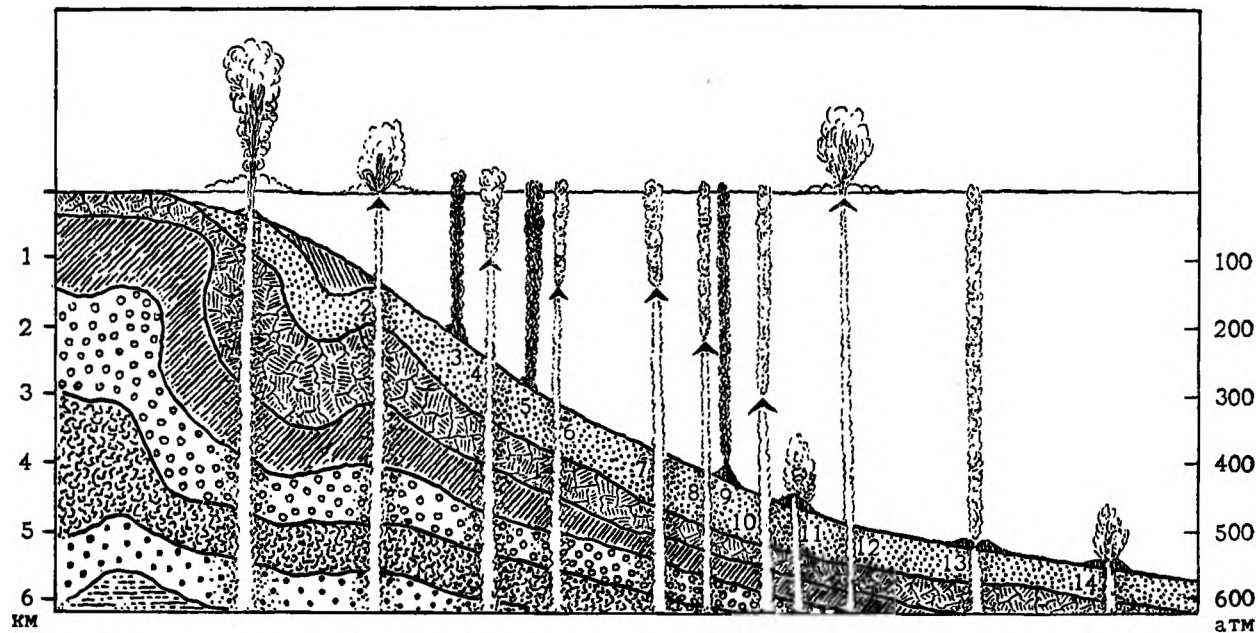
При других отношениях объемов газов и жидкой лавы и в зависимости от содержания в лаве воды взрывные извержения могут происходить на меньших глубинах, как показано на диаграммах Мак-Бирнея.

Однако известно, что давления, создаваемые взрывами, при обычных извержениях колеблются от 100 до



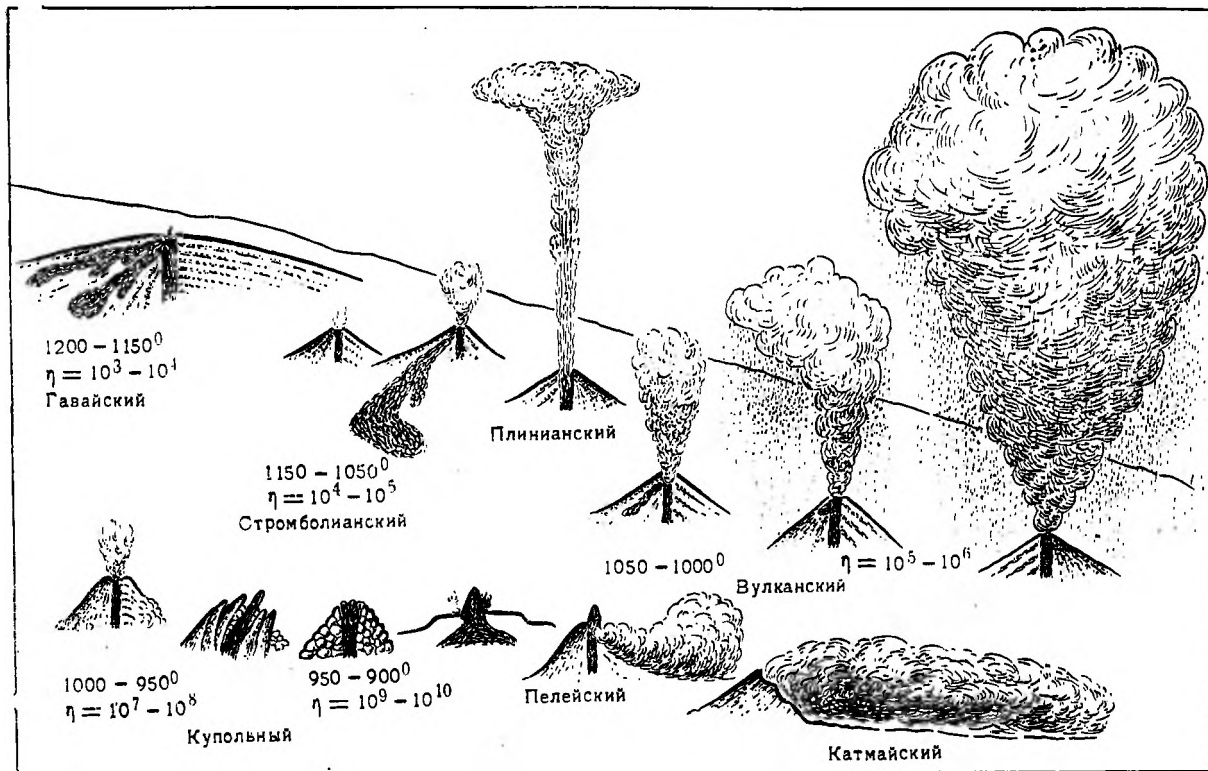
а-температуры извержений (пунктир) и отношения газа к жидкости (сплошные линии) для базальтов с начальной температурой 1100° С в зависимости от содержания воды в магме и глубины извержения (по А. Р. Мак-Бирнею)
б-то же для риолитов

500 атм, а при особо сильных достигают около 2500—3000 атм. Гидростатическое же давление воды на глубине 2000 м примерно равно 200 атм, а на глубине 4000 м — около 400 атм. Таким образом, если давления взрывов значительно превышают 400 атм и достигают первых тысяч атмосфер, то, следовательно, возможны взрывные извержения на больших глубинах, чем 2000 или 4000 м, и накопления на дне морей и океанов вулканического обломочного материала.



Схематический разрез подводных вулканов

1—вблизи Исландии; 2—вблизи Азорских островов; 4—в Северной Атлантике; 6, 7, 13—в Экваториальной Атлантике; 8, 10—в море Банда; 12—вблизи острова Самоа; 3, 5, 9—теоретические (см. стр. 86); 11, 14—предполагаемые



Типы извержений

По условиям, существующим на глубинах океанов и морей, К. К. Зеленов, полагает, что наиболее распространенным типом извержения на их дне должны быть экструзивные извержения. Лава выжимается и как бы внедряется в очень плотную на глубине воду, которая не дает возможности особо растекаться лаве и расширяться образуемому под водой вулканическому сооружению.

Подводные извержения основной магмы на больших глубинах вследствие растворимости большинства выделяющихся газов в воде и большого давления налегающей толщи воды происходят без особых газовых выбросов и поэтому могут быть незаметными. Извержения же кислой магмы, богатой газами, обычно сопровождаются всплыванием на поверхность морей обломков пемзы, что свидетельствует о приблизительном (так как течение их сносит) месте извержения. Газы, выделяющиеся во время менее глубоких подводных извержений, частично растворяются в воде, а частично выделяются как составная часть выбрасываемых газопаровых колонн и облаков.

Извержения на малых глубинах почти всегда взрывные, так как лавы, помимо заключенных в них газов, изливаясь на дне морей, соприкасаются с холодной водой и, с одной стороны, охлаждаются и растрескиваются, а с другой — нагревают воду и превращают ее в пар, который, расширяясь, дает добавочную энергию, способствующую преодолению давления воды, раздроблению лавы на мелкие обломки и выбросу их сквозь водяной слой и воздух.

Когда поднимающаяся магма приходит в соприкосновение с водой, почти одновременно становится видимой на поверхности океана черная колонна, прорывающая у ее основания плоское горизонтальнодвигающееся во все стороны с ураганной скоростью кольцеподобное белое облако. Названное основной волной, оно появляется во время термоядерных взрывов у основания взрывного грибообразного столба (это наименование стало применяться и для описания подобных облаков, возникающих при вулканических извержениях).

Например, во время извержения вулкана Тааль (Филиппины) такое облако двигалось с начальной скоростью более 50 м в секунду, ломало на берегах залива все деревья в пределах одного километра от центра извержения и обдирало их песком на расстоянии до 8 км.



Подводное извержение (фото Г. Тагиева)

Горизонтальнодвигающиеся белые облака — явление довольно частое не только при извержениях в океанах, морях и озерах, но и в тех местах, где подземная вода в больших количествах имеет доступ к вулканическому каналу.

Подводные извержения весьма многочисленны. Одно из последних — Сюртсея — началось 13 ноября 1963 г. на глубине около 130 м у южного берега Исландии. Предвестниками его был запах серы, который ощущался за три дня жителями ближайшего островка, а накануне извержения примерно в 3 км к юго-западу от места подводного извержения температура морской воды внезапно повысилась с 7,0 до 9,4°. Однако сейсмографы не отметили никаких толчков или дрожания — видимо, извержение началось на малых глубинах.

Извержения, ставшие заметными 14 ноября, происходили из трещины длиной 300—400 м. При этом пары воды и газ вместе с вулканическим обломочным материалом различных размеров, называемым тефрой, выбрасывались ввысь примерно через каждые полминуты. Извержение было взрывным — фреато-магматическим. Оно было таким до тех пор, пока выход канала находился под водой и даже пока края образовавшегося кратера были настоль-

ко низкими или проницаемыми, что морская вода могла беспрепятственно вливаться в кратер.

Характерная особенность подводных взрывных извержений Сюртсея — выбросы переполненных пеплом лохматых туч, похожих по своей форме на петушиные хвосты. Черные тучи подымались в воздух на высоту 100—500 м, а иногда и до 1000 м, теряли довольно быстро пепел и становились белыми, состоящими главным образом из паров воды.

Временами происходили выбросы более сильные, чем предшествующие обычные эксплозивные извержения. Мощные столбообразные струи-колонны были похожи на выбросы пара из буровых скважин, но только они более стремительные и значительно больших размеров. В течение нескольких часов они непрерывно выбрасывали вертикально вверх шлаки и пепел вместе с раскаленными бомбами. Особенно величественная картина извержения наблюдалась ночью. Вот как описывает ее С. Тораринссон, плававший в это время на небольшом суденышке по бурному океану: «Вулкан был чрезвычайно активен, извергаемая колонна непрерывно и стремительно поднималась ввысь, и, когда наступила ночь, она представляла собой столб огня, а весь конус был раскаленным от бомб, которые катились по его склонам вниз, в белый прибой моря, окружавший остров. Вспышки молнии освещали извергаемые облака, а раскаты грома громыхали над нашими головами. Грохот от ударов молнии, громкие звуки и рев от извергаемого облака и взрывы разрывающихся в море бомб создавали симфонию, производившую очень сильное и глубокое впечатление. А в это время на небе серповидная луна стремительно двигалась между мчавшимися облаками.

Описывая все это, я сознаю, насколько безнадежно малы мои возможности дать верное описание таких грандиозных проявлений стихий. Для выполнения этого необходим романтический гений Байрона или Делякруа».

В первые дни извержения образовавшийся остров рос не по дням, а по часам. 15 ноября он имел высоту 10 м, 16 ноября — около 40 м, длина его достигала 550 м. 19 ноября остров уже поднялся до 60 м и удлинился до 600 м. Скорость колоннообразной струи у основания составляла почти 120 м в секунду, а на высоте 6,5 км в среднем — около 12 м в секунду. Черная струя тефры часто возвы-



Наземное извержение вулкана Сюртсея (фото С. Тораринссона)

палась на 800 м и изредка на 1600 м. В течение первых месяцев выделилось около 10^{18} эрг/сек тепла, эквивалентного сгоранию примерно 13 млн. л газаolina в час, или 215 000 л в секунду.

Вблизи места извержения в морской воде увеличилось содержание кремнезема и фосфора. Когда извержение ослабевало, кратер быстро разрушался и наполнялся морской водой. После этого сразу же или с некоторыми промежутками времени возобновлялись взрывные извержения. Эруптивные облака во время подводных извержений подымались на 5—9 км над уровнем моря. 28 декабря начались подводные извержения в новом месте, в 2,5 км к востоку — северо-востоку от Сюртсея.

4 апреля 1964 г. начала изливаться лава, изолировав канал от морской воды. Взрывные извержения прекратились. В кратере образовалось огненное лавовое озеро. Постепенно накапливаясь и переливаясь через его край, лава текла по склонам. Она фонтанировала на высоту 50—100 м и направлялась рекой к морю. Когда раскаленная докрасна лава вступала в контакт с морской водой, она, быстро охлаждаясь, разламывалась на обломки различных размеров. При этом вода превращалась в пар, который в зависимости от количества изливавшейся лавы и ее темпе-

ратуры подымался ввысь то относительно небольшими струями, то клубился достаточно большими белыми массами.

Лава продолжала изливаться с некоторыми перерывами в июне — июле 1964 г. вплоть до 17 мая 1965 г. С 22 мая началось новое подводное извержение, продолжавшееся до середины октября. В результате в 600 м к востоку—северо-востоку от Сюртсея возник островок площадью 0,2 км² и высотой 70 м, который к 24 октября был размыт. А 26 декабря произошли подводные извержения в 800 м к юго-западу от Сюртсея, образовавшие новый островок. Извержения прекратились 10 августа 1966 г., и через несколько дней этот островок тоже исчез.

19 августа снова начались извержения в первоначальном кратере Сюртсея, в открывшейся здесь трещине длиной около 220 м, и продолжались до конца года. Реки и ручьи лавы, постепенно покрываясь корой, продолжали течь под ней, как по туннелю, к морю и, нагревая в нем воду, создавали облака пара. К 1 января 1967 г. лавовая трещина удлинилась до 400 м, но излияния лав постепенно стали уменьшаться и окончились 5 мая. После этого почти до конца года выделялись белые пары, создавая опять впечатление новых извержений.

Все извержения Сюртсея происходили, по-видимому, из пяти трещин длиной от 100 до 500 м, расположенных уступами. Длина всей трещинной системы около 5 км.

За время извержений было выброшено около 0,7 км³ тефры, лавы же излилось почти 0,3 км³. Это была основная оливино-базальтовая лава, содержащая 45—46% SiO₂ и только 0,03% H₂O. Максимальная температура ее равнялась 1138° С, вязкость 10³—10⁴ пуаз.

Псевдоподводные извержения

В достаточно крупных кратерах наземных вулканов в результате дождей или снегопада образуются кратерные озера. Характерной особенностью извержений таких вулканов является смешивание извергаемого, раздробленного на мелкие обломки лавового материала с водой и излияние их (через выемку в кратере, образовавшуюся из-за разрушения части стенок кратера от взрыва или обвала) горячими грязевыми потоками, называемыми горячи-

ми лахарами, по склонам вулкана и пониженным местам, окружающим его подножие.

Грязевые потоки могут образоваться при взрывных извержениях и во время сильных дождей-ливней. Мелкие и мельчайшие обломки лавы смешиваются с дождевой водой в воздухе, и, падая на склоны вулкана, покрытые вулканической пылью, песком и более крупными обломками лавы, образуют холодные грязевые потоки, называемые холодными лахарами.

Образовавшиеся горячие или холодные грязевые потоки текут в зависимости от рельефа и количества грязи с большой скоростью на большие расстояния — от 10 до 100 км. Грязевые потоки несут не только мелкие обломки, но и довольно крупные глыбы лав.

Грязевые потоки образуются также и от смешивания раскаленного обломочного материала со снегом непосредственно у места извержения и на некотором расстоянии от него, как это происходило при извержении вулкана Безымянного 30 марта 1956 г. Снег толщиной 1—2 м был покрыт раскаленным обломочным материалом на площади около 500 км², который вызвал бурное его таяние и образование мощных горячих грязевых потоков. Захватывая крупные глыбы лав и сокрушая все на своем пути, они пронеслись на расстоянии около 85 км (Г. С. Горшков, Г. Е. Богоявленская).

Подледниковые извержения

Извержения вулканов, кратеры которых заполнены ледниками и водой, сопровождаются потоками воды, с глыбами льда и мелких и крупных камней, называемыми в Исландии «иокулхлауп». Лед, накопившийся в кратере, силой взрыва раздробливается и от соприкосновения с раскаленными обломками лавы тает. Последние вместе с водой выносятся огромными массами вниз к подножию вулкана.

В Исландии наиболее активными подледниковыми вулканами являются Катла и Гримсвётн. «Ледниковые» извержения их сопровождались излиянием водно-песчаных потоков объемами соответственно 100 000 м³/сек и 40 000—50 000 м³/сек.

На вершине Гримсвётна находится впадина площадью около 40 км², в которой в результате таяния льда и снега, происходящего отчасти благодаря нагреву их фума-

ролами и сольфатарами, накапливается 0,6 км³ воды в год.

До 1934 г. извержения этого вулкана происходили довольно регулярно через 9—12 лет. За каждый такой промежуток покоя во впадине накапливалось около 7 км³ воды.

Как полагают, извержения Гримсвётна возникают от уменьшения давления воды на дно впадины и на канал вулкана. Вода, собирающаяся во впадине, продельывает путь подо льдом и затем вытекает. В связи с этим понижается ее уровень во впадине, уменьшается давление на лаву в канале и начинается само подледниковое взрывное извержение, сопровождаемое иокулхлаупами.

Газовые извержения

Газовые извержения, прорывающие слои земной коры, могут происходить в результате быстрого расширения выделяющихся из магмы газов, т. е. от взрыва или в результате стремительного расширения перегретых теплом (исходящим от магматического вещества) скоплений подземных вод, переходящих в пар.

При очень сильных извержениях газы и пары, как бы просверливая, прорывают канал и выбрасывают обломки прорванных горных пород, образуя на земной поверхности вал, окаймляющий канал обычно круглого или овального сечения. При относительно слабых взрывах лишь раздробляются слои пород, но без или с очень незначительным выбросом обломочного материала, образуя трубки взрыва.

Газовые извержения происходят также по существующим каналам. Примером служит извержение газовой фазы Везувия в 1906 г. Эксплозивно-эффузивное извержение, начавшееся 27 мая 1905 г. и усилившееся с 4 апреля 1906 г., продолжалось около 10 месяцев. 8 апреля в 3 час. 30 мин. оно сменилось очень сильным газовым извержением, длившимся непрерывно 18 час. По подсчетам Перрета и Фридлендера, количество выброшенных газов и паров было эквивалентно 1,75 км³ жидкой воды. Эти данные считаются слишком завышенными, хотя объем выделившихся газов был достаточно велик.

В связи с этим, естественно, возникают вопросы, в каком состоянии находится газовая фаза в вулканических



Ключевской вулкан

Кратер Килауэа



очагах, залегающих на глубинах от 6 км (у Везувия) до 60 км (у многих других вулканов), при давлениях от 2000 до 16 000 бар и при температуре окружающих горных пород от 200 до 1400°, а также сколько газов и паров воды может раствориться в магме?

Химические анализы лав показывают, что невыделившихся (оставшихся в них) газов и воды обычно 1—2 и реже 5—6 вес. %. Предприимались и другие попытки определить их количество — по летучим соединениям, входящим в состав минералов магматических горных пород, и по газам, извлеченным из лав путем их раздробления и постепенного нагревания до расплавления. Принимаются во внимание и возможные пределы растворимости газов в силикатных расплавах, установленные экспериментальными исследованиями. Оказалось, что в силикатных расплавах кислого (риолитового) состава при температуре 900° и давлении 4000 бар может раствориться максимум около 10 вес. % воды (Р. У. Горансон), а основного (базальтового) состава при температуре 1200° и давлении около 6000 бар примерно столько же (Н. И. Хитаров). Исследования же Г. С. Кеннеди допускают полную смесимость воды и силикатного расплава (магмы) при значительно больших давлениях.

Е. К. Мархинин считает, что определить количество газов в лавах можно, если известна энергия вулканического взрыва, представляющая собой работу, совершаемую газом при расширении от очень небольших пузырьков, образующихся в магме перед взрывом, до объема, который он займет при атмосферном давлении. Им была предложена формула

$$E = 10^8 \nu x (2x^{0.3} - 1),$$

устанавливающая зависимость между энергией вулканического взрыва E (в эрг), объемом образовавшегося первичного пирокластического материала ν (в см³) и количеством выделившихся при взрыве ювенильных газов x (в вес. %).

Если пирокластический материал приводится не в объемных, а в весовых единицах, то формула принимает вид

$$E = 4 \cdot 10^7 m x (2x^{0.3} - 1),$$

где m — масса свежего пирокластического материала, (в г).

Если считать, что энергия взрыва E почти целиком является кинетической энергией, то вычисление x еще более упрощается с определением скорости (U) выбрасываемых взрывами обломков лавы

$$U = \sqrt{2,10^7 \cdot x (2x^{0.3} - 1)}.$$

По этой формуле для извержения Ключевского вулкана, происшедшего в ночь с 14 на 15 августа 1961 г., Е. К. Мархинин получил следующие данные. Скорость полета выброшенных бомб и шлака в среднем колебалась от 64 до 80 м/сек, а содержание газов равнялось 0,7—0,9 вес. %. При извержении вулкана Заварицкого в 1957 г. скорость полета обломков была 170 м/сек, газы же, вызвавшие взрыв, составляли около 2,4% от веса лавы.

Однако выделение газов в количествах, избыточных по сравнению с их возможностью раствориться в магме, Ф. Перрет объяснял ликвационной дифференциацией — разделением магмы на жидкость и газ до момента извержения.

Действительно, в отдельных случаях наблюдается раздельное извержение газов и излияние лавы. При некоторых извержениях Этны достаточно сильные газовые выбросы происходили из субтерминального кратера, а в то же время несколько ниже, в боковом отверстии, находилась огненно-жидкая лава, над которой подымались в незначительном количестве почти прозрачные пар, газы и летучие соединения.

Существуют и другие примеры раздельного извержения. В 1938 г. из нижнего кратера Билукая изливалась лава, из вершинного — выделялись газы, а из отверстия, обращенного к вершине Ключевского вулкана, во время таяния снегов происходили фреатические извержения. Мощное газовое извержение Везувия в 1906 г. можно предположительно объяснить прорывом по возникшим трещинам в вулканический канал воды из находящегося рядом с вулканом моря, т. е. оно было фреатическим.

Фумарольная и сольфатарная деятельность

Перед извержениями и после них часто в течение очень длительного времени (года и даже десятилетия) из отдельных небольших трещинок и канальчиков (обычно неправильной формы) выделяются струи газов и паров воды, называемые фумаролами. Они располагаются преимущественно на внутренних (реже на внешних) склонах кратера и его дне, а также на лавовых потоках и пирокластических отложениях.

Газы в фумаролах кратеров выделяются из магмы или из раскаленной лавы в канале вулкана. Фумаролы же на потоках и пирокластических образованиях возникают в результате выделения остаточных газов из остывающей лавы и пирокластике (вследствие чего они являются бескорневыми, их называют также вторичными). Кроме того, фумарольные газы часто представляют собой смесь упомянутых газов с газами, возникающими от нагрева горячими вулканическими продуктами почвы и растительного покрова. В газах фумарол часто находятся и атмосферные газы.

Во всех фумаролах: первичных и вторичных, в собственно фумаролах, сольфатарах и мофетах преобладают пары воды. Но у собственно фумарол, наиболее высокотемпературных (около $800-400^{\circ}$), значительную роль играют галоиды и среди них хлористый и фтористый водород; в сольфатарах с температурой несколько ниже (около $400-150^{\circ}$) — сернистый газ и сероводород, а в мофетах, температура которых около 100° , — углекислый газ.

Упомянутые газы являются главными, других же газов намного меньше.

Из перечисленных разновидностей фумарольной деятельности вулканов достаточно широко распространенной и наиболее длительной является сольфатарная стадия. Она подразделяется на сосредоточенную сольфатарную деятельность, сконцентрированную в самом вулкане, чаще всего в кратере, в результате которой выделяются отдельными мощными или маломощными струйками газы и пары воды, и на рассредоточенную на относительно большей площади, где местами газы и пары воды, выделяясь, как бы парят или поднимаются слабыми струйками, образуя сольфатарные поля. Последние не связаны непосредственно с вулканическими каналами.

Сольфатарная деятельность наблюдается, например, на вулкане Сольфатара в Италии, Центральном Семячике и Мутновском на Камчатке и на многих других вулканах. На внутренних склонах кратера обычно выделяются как мощные, так и незначительные струи сольфатар, а над частью дна кратера, покрытого жидковатой глиноподобной массой, подымается пар. Прорываясь сквозь такую массу, газы местами образуют небольшие грязевые вулканчики. С уменьшением температур сольфатар, свидетельствующим, как правило, об угасании вулканической активности, изменяется и состав их газов — начинает преобладать углекислый газ. Они превращаются в мофеты, которые действуют в течение еще более длительного времени.

Сернистый газ, сероводород и углекислый газ, удельные веса которых больше удельного веса воздуха, стелются по земле, направляясь в понижения. Все живое, попадая в такие места, гибнет. Это явление легло в основу легенды, возникшей еще в древние времена, о том, что озеро Аверно на Флегрейских полях в Италии, заполнившее дно кратера вулкана, служит входом в ад, потому что люди, приближавшиеся к нему, погибали. Выделявшиеся из сольфатар и мофет, расположенных у озера, газы были причиной их гибели.

Широко известен в кратере вулкана Сольфатара Собачий грот, где гибнут собаки из-за обилия выделяющегося из мофеты углекислого газа, который стелется относительно тонким слоем по дну грота. Люди же, проходя по гроту, испытывают только достаточно высокую температуру воздуха, нагреваемого этой мофетой.

Гейзеры

В некоторых областях современной или недавно прекратившейся вулканической деятельности, в которых еще происходит более интенсивный поток тепла из вулканического очага и существует вблизи земной поверхности течение подземных вод, имеются источники, периодически выбрасывающие горячую воду и пар, — гейзеры.

Характерной особенностью деятельности гейзеров является периодическая повторяемость покоя, наполнения котловинки горячей водой (температура которой близка

к температуре точки кипения на высоте нахождения гейзера), фонтанирование пароводяной смеси и стремительные выбросы пара (на высоту от нескольких метров до нескольких десятков метров, а у некоторых гейзеров — и на сотни метров), постепенно сменяющиеся спокойным их выделением и затем прекращением парения и наступлением стадии покоя. Такой полный цикл наблюдается не у всех гейзеров, а по продолжительности они различаются на регулярные и нерегулярные. У первых весь цикл и его отдельные стадии (покоя, наполнения, фонтанирования и выброса) продолжаются почти одно и то же время, а у вторых — продолжительность и циклов и стадий изменяется. Продолжительность отдельных стадий измеряется минутами и десятками минут, за исключением стадии покоя, которая продолжается у разных гейзеров от нескольких минут до нескольких часов, а иногда и несколько дней.

Вода, выбрасываемая гейзерами, — относительно чистая, слабоминерализованная (1—2 г/л), хлоридно-натриевая или хлоридно-гидрокарбонатно-натриевая. Она содержит относительно много кремнезема, отлагающегося у устья канала в виде минерала гейзерита, по составу близкого к опалу. Главная масса воды в гейзерах атмосферного происхождения, возможно, с примесью магматической воды.

Гейзеры известны на Камчатке, в Исландии, в Северной Америке, Новой Зеландии, Тибете (на высоте около 4800 м) и в некоторых других областях.

Деятельность гейзеров относительно кратковременная и зависит от ряда условий — сохранения или увеличения теплового потока, притока к каналу гейзеров подземных вод и др. Так, знаменитые Большой Гейзер и Строккур в Исландии много лет не извергались. Однако в 1971 г. Большой Гейзер вновь начал действовать, но с большими перерывами и крайне нерегулярно. В настоящее время в Исландии функционируют около 30 менее мощных гейзеров, среди которых выделяется гейзер Прыгающая Ведьма (Грилла), выбрасывающий горячую воду, смешанную с паром, на высоту 15 м приблизительно через каждые 2 часа.

В Северной Америке из почти 200 гейзеров Йеллоустонского национального парка самыми большими являются Гигант и Старый Служака с периодами извержения пара и воды для первого через три дня и с выбросами

их на высоту до 30 м, а для второго — через каждые 53—70 мин. и с выбросами примерно на такую же высоту.

В Новой Зеландии мощным и очень красивым был гейзер Тетарата, расположенный на холме высотой 25 м, сложенном из террас розового кремнистого туфа, образовавшегося в результате деятельности гейзера. Извержение вулкана Тараверы в 1886 г. разрушило террасы, и гейзер перестал действовать.

Другой новозеландский гейзер Ваймангу, который был самым большим и мощным на Земле, действовал и притом нерегулярно только пять лет, с 1899 по 1904 г. Один период продолжался от 5 до 30 час. Во время сильных извержений Ваймангу выбрасывал при каждом извержении около 800 т воды, и захваченные струей воды и пара камни поднимались до высоты 457 м. Прекратились эти извержения вследствие понижения на 11 м уровня воды в расположенном около гейзера озере Таравера, которое произошло в результате прорыва подпруды озера.

В настоящее время из новозеландских гейзеров наиболее мощный — Похуту, периодически фонтанирующий на высоту 20 м.

На Камчатке крупных гейзеров — около 20, а всего около 100. Из них самый большой — Великан, устье которого представляет собой котловинку размерами 3×1,5 м и глубиной около 3 м; на дне находится канал. Один его цикл длится 2—3 час., но само извержение очень кратковременное — около 2 мин., при этом струи воды поднимаются на 40 м, а пар, бурно выделяясь, — на несколько сотен метров.

Необходимым и обязательным условием существования гейзеров является питание их в приповерхностных частях каналз горячими водами и нагрев выше температуры кипения на данной высоте, т. е. до перегретого состояния. При этом верхняя часть канала должна быть заполнена водой, которая создает достаточное давление, чтобы находящаяся ниже горячая вода смогла нагреться до перегретого состояния. Затем должно произойти уменьшение давления столба воды в канале, в результате чего перегретая вода будет переходить в пар. Упругость образующегося пара становится достаточной, чтобы преодолеть давление воды в канале. За счет значительного увеличения объема пароводяная смесь, фонтанируя, выбрасывается, а затем после исчерпания в канале перегретой

воды фонтанирование прекращается. Выброшенная вода, несколько охлажденная, частично падает в чашу гейзера и попадает в его канал. Большая же часть воды просачивается в канал из боковых пород. Там нагревается, перегревается, и снова происходит массовое образование пара, создающее достаточное давление, под воздействием которого и происходит выброс пароводяной смеси.

Горячие источники

Вулканическая деятельность сопровождается и образованием горячих вод, которые формируются под воздействием магматических газов и приносимого ими тепла. С постепенным понижением температуры пары воды переходят в жидкое состояние. В воде в зависимости от термодинамических условий (температуры и давления) растворяются другие газы. К ним почти всегда примешиваются подземные воды. Как показало бурение в некоторых вулканически активных областях, при температурах в скважинах около 300° на глубинах 500 м и более в воде растворяются наряду с легкорастворимыми вулканическими газами и некоторые вещества, извлеченные из боковых пород.

На земную поверхность горячие источники вытекают при температуре ниже точки кипения воды, т. е. около 100° и ниже, но формируются они при различных высокотемпературных условиях. Горячие воды в областях современного вулканизма имеют различное происхождение и различный химический состав. Главные из них: связанные в той или иной степени с вулканизмом перегретые воды с азотно-углекислыми компонентами, формирующиеся на значительных глубинах в зонах теплового воздействия вулканических очагов. Образование углекислых терм обусловлено притоком магматических газов и преимущественно процессами разложения и видоизменения пород на глубине. Сильно кислые (сероводородно-углекислые) горячие воды возникают в окислительной обстановке вблизи поверхности Земли под непосредственным воздействием вулканических газов.

Вулканические продукты и их формы

Магма, лишенная в процессе подъема и извержения газов и находящаяся еще как в жидком, так и в твердом состояниях, называется лавой.

Выше рассказывалось об основных, средних и кислых магмах. Также подразделяются и вулканические горные породы, или вулканыты. По химическому и минеральному составам они бывают известково-щелочные и щелочные. Среди основных наиболее распространены базальты, средних — андезиты и кислых — дациты и риолиты.

Как уже отмечалось, в зависимости от рельефа местности, количества и вязкости очень горячая и жидкая лава заливает местность, образуя лавовый покров в сотни квадратных километров. Мощностъ отдельных потоков очень жидких лав — несколько десятков сантиметров, у более вязких лав она достигает десятков метров и больше. Излияния одного потока на другой, происходящие в течение одного длительного извержения, приводят к образованию мощных пластов.

Потоки маловязкой лавы, застывая, принимают форму пахвойхой. Когда лава становится более вязкой, поток покрывается обломочной лавой — аа, создавая весьма неровную поверхность благодаря хаотическому нагромождению глыб различных размеров. Еще более вязкие лавы образуют особую лаву, называемую глыбовой лавой санторинского типа, отличающуюся более крупными (чем лава аа) угловатыми глыбами с относительно гладкими поверхностями их сторон.

Обычно при излиянии лавы образующаяся на потоке корка разламывается на небольшие глыбы, которые передвигаются вместе с потоком и с его фронтальной и боковых частей скатываются на землю. Лава покрывает глыбы, и, когда ее движение прекращается, образуется как бы слоеный пирог. Внизу слой небольших глыб лавы, сцементированных той же лавой, в середине — более мощный слой плотной лавы, а наверху — скопления несцементированных глыб.

Маловязкие базальтовые лавы, вытекая из кратера, имеют температуру 1200—1100° и, охлаждаясь до 700—600°, способны еще течь. Так, изливаясь, базальтовая лава Билюкая сохраняла свою пластичность при 690°.

Более вязкая андезитовая лава у вулкана Санторин имела температуру у кратера около 975° , при 840° она еще текла, а при 756° она уже перестала двигаться и стала твердой.

Скорость движения лавы в потоке определяется его вязкостью, которая по мере охлаждения лавы увеличивается, и, следовательно, скорость движения потока уменьшается. Так, базальтовый лавовый поток Билюкая в 1938 г. двигался в 10 м от жерла со скоростью 30 м/мин, в 50 м — со скоростью 10 м/мин, в 100 м — со скоростью 6 м/мин, а в 1000 м — со скоростью 0,6 м/мин. Скорость движения лавы зависит и от угла склона местности, по которой она течет. Так, лава Кидзуэа в 1954 г. текла по склону в 30° со скоростью около 900 м/мин, а далее по более пологому склону всего со скоростью 5 м/мин.

Скорость движения фронтальной части базальтового потока Юбилейного (Камчатка) в 1945 г. на 7—10-е сутки от начала извержения была 250—300 м/сутки. После окончания извержения, на 6-е сутки, поток еще двигался со скоростью 70 м, а перед окончательным застыванием, на 9-е сутки, — 10 м/сутки.

Перестав двигаться и в дальнейшем охлаждаясь, лава растрескивается на крупные глыбы неправильной формы. В некоторых же случаях, когда поток уже полностью остановился, при остывании и переходе вещества из пластичного в твердое состояние лава растрескивается, образуя пяти- и шестиугольные столбы высотой примерно от метра до нескольких десятков метров.

Те основные лавы, которые еще жидкими попадают в воду или влажный ил, образуют шаровые, подушечные или эллипсоидальные формы вследствие стремления жидких веществ принять сфероидальную форму в результате поверхностного натяжения. При полном охлаждении этот материал покрывается стеклянной коркой, внутри он большей частью кристаллический и разбит возникающими при охлаждении радиальными трещинами разрыва, создающими радиально-пирамидальную отдельность.

Вулканическая деятельность, особенно взрывная, формирует разнообразный первичный обломочный или рыхлый вулканический материал, называемый пирокластикой, или тефрой. Это — вулканическая пыль и песок, лапилли и более крупные обломки различной формы и размеров,

выброшенные во время извержения, причем вулканическую пыль и песок обычно объединяют в вулканический пепел. Обломки, образовавшиеся от раздробления взрывами лавовой корки, имеют угловатую форму, в то время как выброшенные взрывами брызги еще жидкой лавы, застывая, в полете принимают округленные и извилистые очертания.

Интересными вулканическими продуктами являются вулканические бомбы, которые в зависимости от формы и характера залегания зародышей (магматических шпиров и обломков лав, газовых пузырей, включений чуждых пород) в канале или кратере вулкана; степени вязкости (текучести) лавы; живой силы в полете комка лавы (сопротивления воздуха и силы тяжести); силы расширения (упругости) заключенного в комке лавы газа и осевого вращения принимают различные формы.

Начальной стадией образования бомб является возникновение плотных или богатых газом шпиров в лаве (находящейся в канале вулкана), возникающих, по-видимому, вследствие колебания ее температуры. Следующий этап развития бомб — обволакивание шпира или газового пузыря лавой и отрыв их от лавовой массы с одновременным формированием лавового хвоста. Дальнейшим этапом является преобразование в полете еще пластичного лавового тела. При этом на ту или иную форму бомб оказывают некоторое влияние различно направленный толчок (удар) выброса, перпендикулярный или косой, вращательное движение, охлаждение в полете, начальная скорость полета, сопротивление воздуха, вес бомбы, вязкость лавы и другие факторы.

При обыкновенных вулканических извержениях воздействие сопротивления воздуха на полет малых бомб, если их диаметр меньше 50 см, очень велико. Если же диаметр бомбы больше метра, то сопротивление воздуха мало и не играет роли. Начальная скорость полета бомб для различных извержений колеблется в среднем от 135 до 210 м/сек.

Бомбы бывают самые различные: похожие на лепешки, шар, эллипсоид, с одним удлинением в виде груши или с двумя удлинениями (типа веретена), полосообразной, угловато-округлой (типа хлебной корки) и сложных форм.

Возгоны. В местах выходов фумарол часто встречаются минералы, совершенно отличные от минералов самой лавы как по составу, цвету и виду, так и по своему происхождению. Их называют возгонами, но по существу только немногие из них появляются в результате простой возгонки — непосредственно из газообразного вещества. Большая же часть минералов — продукты более сложных процессов. Они возникают путем взаимодействия различных выделяющихся из вулкана газов; вулканических газов с газами органического происхождения и с атмосферными газами; вулканических газов с твердыми веществами — лавами, шлаками и вулканическим песком и, наконец, в процессе преобразования ранее выделившихся возгонов.

Все эти фумарольные минералы формируются обычно при более высоких температурах — 800—200°. Те же минералы, которые образуются при более низких температурах — 200—150° и меньше — и которые нарастают чаще всего на камешках и песчинках, лежащих на влажной почве, возникают не только при участии поднимающихся газообразных веществ, но и в результате взаимодействия с жидкими веществами — водой и серной кислотой. Их лучше называть наростами.

Примерами прямой возгонки могут служить галоиды — галит (NaCl), сильвин (KCl), вильомит (NaF), селлеит (MgF_2), котунит (PbCl_2) и другие, характерные для некоторых вулканов.

Взаимодействие двух газообразных веществ отмечал Г. Тазиев и его сотрудники, исследовав газы вулкана Этны. В улавливаемых в боковом отверстии вулкана, непосредственно над самой огненно-жидкой лавой (основной по своему составу), газах были обнаружены мелкие кристаллики оловянного камня SnO_2 . Очевидно, что из лавы выделялись летучие соединения SnCl_4 или SnF_4 и H_2O и в результате значительного падения их температуры произошла реакция между ними с образованием оловянного камня.

Во время извержения Ключевского вулкана лавовый поток Туйлы, бокового кратера, двигался по лесу. Когда извержение кончилось, трещины в лаве вблизи кратера, заполнились нашатырем (NH_4Cl), образовавшимся, по-ви-

димому, от взаимодействия HCl с органическими веществами — растительностью леса.

Контакт летучих веществ с веществом лавы порождает возгоны и более сложного состава, как малладрит (Na_2SiF_6), криптогалит $(\text{NH}_4)\text{SiF}_6$ и др. Кроме того, возникает ряд фумарольных минералов из групп окислов, сернистых, серноокислых и углекислых минералов. Среди возгонов-нарослов преобладают водные алюмо-серноокислые минералы, галотрихит, пиккеренгит, мелантерит, алуноген и др.

Вулканы, особенно извергающие щелочные лавы, богаты разнообразными минералами, в том числе и возгонами. Так, среди минералов Везувия обнаружено 5 минералов-элементов, 11 сульфидов, 18 окислов, 31 галоид, 11 карбонатов, 3 манганата, 33 сульфата, 1 алюминат и 2 феррита, 2 фосфата и 1 ванадат. Среди возгонов вулканов Камчатки обнаружено, по данным С. И. Набоко, 1 элемент, 3 сульфида, 8 окислов, 11 хлоридов, 6 фторидов, 3 карбоната, 2 бората и 36 разных сульфатов.

Вулканические газы

Вулканические газы, т. е. газы, выделяющиеся во время вулканической деятельности, играли и играют важную роль в вулканических извержениях, вулканических землетрясениях, переносе тепла, в горячих источниках, связанных с вулканической деятельностью, а на ранних этапах возникновения Земли — в образовании первичной атмосферы, первичной гидросферы (первых дождей, рек, морей и океанов).

Кроме того, вулканические газы играют заметную роль в процессах магматической дифференциации, метасоматизма и в образовании месторождений некоторых полезных ископаемых.

Особенно важна роль вулканических газов в извержениях, так как от нахождения их в магме в растворенном состоянии или в химических соединениях во многом зависят ее вязкость и уменьшение плотности, а с уменьшением плотности магма легче поднимается к земной поверхности. От степени насыщения магмы газами, как уже отмечалось, зависит во многом и характер вулканической деятельности — от незначительных выделений газов до мощного фонтанирования лавы и от как бы «кипения»

жидкой лавы до сильного разбрызгивания и взрывов насыщенной пузырьками и пузырями газов лавы.

Вулканические газы выделяются из канала вулкана во время извержения большей частью огромными массами, а до и после извержения — мощными или маломощными струями из фумарол, сольфатар, мофет и в незначительном количестве — из гейзеров и горячих источников, явно связанных с вулканической деятельностью.

Главным источником вулканических газов должна была бы быть магма, но химический состав магматических эманаций — магматических газов и летучих соединений — еще точно неизвестен. Только предполагают на основании некоторых данных, что магматическими эманациями являются все летучие вещества.

В действительности почти все вулканические газы представляют собой смесь магматических газов; газов, захваченных из боковых пород; газов, образующихся в результате разложения веществ под воздействием высокой температуры и реакций между ними и атмосферных газов, циркулирующих в достаточно пористых и проницаемых породах, окружающих вулканические каналы. Таким образом, вулканические газы, выделяющиеся на земной поверхности, представляют собой смесь газов различного происхождения.

Химический состав вулканических газов и летучих соединений, выделяющихся во время взрывных извержений, пока еще не определялся. Обычно же и чаще всего определяется состав вулканических газов фумарол, которые в большинстве случаев также представляют собой смесь газов различного происхождения. Выделить и точно установить в ней магматические газы пока достаточно трудно и не всегда возможно.

О составе магматических газов предположительно судят по газам, непосредственно выделяющимся из горячей лавы (лучше всего из лавового озера), и по газам, извлеченным из отвердевшей лавы путем нагревания в вакууме. Имеются попытки определения состава по газам, выделяющимся из мощных фумарол, по химическому составу образующихся возгонов, а также на основании увеличения в фумаролах количеств некоторых газов с одновременным усилением активности вулкана.

Так, при наблюдениях над фумарольными газами боковых кратеров Ключевского вулкана в течение 1935—

1937 г. было отмечено, что при усилении деятельности главного кратера в фумаролах боковых кратеров происходили значительные количественные изменения в содержании H_2O , H_2 , CO и менее значительные — в HCl . По-видимому, они были связаны с изменениями давления в канале вулкана или даже в очаге. В связи с этим было высказано следующее предположение: если между увеличением количеств фумарольных газов и усилением вулканической активности можно установить связь, то можно допустить, что фумарольные газы, реагирующие, в частности, на изменения интенсивности вулканической деятельности, являются глубинными — магматическими — газами. Если же такой связи нельзя установить, то вопрос о генезисе газов остается открытым.

Более детальные и систематические исследования были начаты в 1963 г. Г. Тагиевым и его сотрудниками. Чтобы сопоставить изменения состава фумарольных газов с эруптивной деятельностью, они почти непрерывно брали пробы фумарольных газов и делали их химический анализ, одновременно наблюдая за проявлениями вулканической деятельностью.

Было обнаружено два типа (длиннопериодный и короткопериодный) поведения фумарольных газов. В одних случаях газы выделялись довольно долго почти в одинаковых количествах. Движение их, по-видимому, определялось распределением температур в вулкане. Преобладали газы атмосферного происхождения и лишь незначительно — глубинного.

В других случаях в течение очень коротких промежутков времени количества выделяющихся газов сильно изменялись одновременно с изменением активности вулкана, т. е. количественные изменения происходили в тесной связи с взрывными проявлениями. Температура таких газов, в частности на вулкане Стромболи, была достаточно высокой — от 240 до 1100°C . Большая часть этих газов, считается глубинного происхождения. Среди них водород в виде H_2O или H_2 , углерод в виде CO_2 , CO и может быть COS , сера в виде SO_2 , H_2S , а также HCl , HF и соединения галогенов с металлами.

Изменения количеств газов, связанных с колебаниями интенсивности взрывной активности, зависят, по мнению Тагиева и других исследователей, в значительной степени от изменений газового давления на глубине и от

реакций при высоких температурах. Однако нет полной уверенности в том, что газы, взятые даже в лавовом озере, являются газами, выделившимися только из магмы.

Видимо, более широкое применение изотопов поможет выработать критерии для определения в газовой смеси газов магматического происхождения. Так, например, данные по изотопам гелия, аргона, криптона, ксенона и азота, а также водорода, кислорода, углерода и серы позволяют более уверенно считать их частично выделившимися из магмы. Тем не менее пока допускают, что химический состав газов, выделившихся при высокой температуре из мощных фумарол действующих вулканов, должен быть сходным с составом магматических газов.

Состав вулканических газов достаточно разнообразен. Главные компоненты — H_2O , HCl , HF , SO_2 , CO_2 , H_2S , H_2 , N_2 и другие летучие, преимущественно галогенидные соединения; содержатся, правда немного, и радиоактивные элементы. Из них в фумаролах явно преобладают пары воды (90—95% и даже больше).

В последнее время тщательно взятые при температуре около 900° пробы вулканических газов из бокки Нуово, которые, по всей вероятности, были магматическими, показали подчиненное значение в них H_2O и преобладающую роль CO_2 , количества воды в них колебались от нескольких до почти 50%.

Вулканические газы группировали по разным признакам. Одна из последних классификаций И. Ивасаки вулканических газов — по их температуре у выхода на земную поверхность (табл. 3). Здесь учитываются и газы, выделяющиеся при очень высоких температурах, начиная от 1200° (в предыдущих классификациях максимальной температурой считалось 800°).

Таблица 3

Группа	Температура	Химический состав
I	1200—800°C	H_2O , HCl , SO_2 , CO_2 , $\text{H}_2 > \text{H}_2\text{S}$, N_2
II	800—400°C	H_2O , HCl , SO_2 , H_2S , $\text{CO}_2 \geq \text{N}_2$, H_2 H_2O , SO_2 , H_2S , $\text{CO}_2 \geq \text{N}_2 \geq \text{HCl}$, H_2
III	100—60°C	H_2O , H_2S , $\text{CO}_2 > \text{N}_2 > \text{SO}_2 \geq \text{H}_2$
IV	Меньше 60°C	H_2O , $\text{CO}_2 > \text{N}_2 > \text{H}_2\text{S}$

Разнообразие химического состава вулканических газов объясняется дифференциацией магматических эманаций, вызванной охлаждением и уменьшением давления при их подъеме, а также другими процессами и явлениями, например, реакциями с многими веществами, встречаемыми на их пути, смешиванием с газами немагматического происхождения, привнесом или, наоборот, поглощением отдельных газов и др. Эти факторы могут действовать в недрах Земли и особенно в приповерхностной зоне. Общая схематическая картина дифференциации магматических эманаций такова. При температуре около 1100°C из расплавленной лавы происходит заметное выделение летучих веществ, являющихся магматическими эманациями.

Во многих высокотемпературных фумаролах содержится много перечисленных выше газов и летучих соединений, в частности HCl , HF и H_2 . С понижением температуры до $800\text{--}600^{\circ}\text{C}$ содержания HCl , SO_2 и H_2 постепенно уменьшаются, при этом происходит реакция между сернистым газом и водородом с образованием сероводорода, количество которого постепенно увеличивается.

С уменьшением температуры воды ниже ее критической точки вода из газообразного состояния должна перейти в жидкое, где могут растворяться легкорастворимые вещества — HCl и др.

При дальнейшем остывании после выделения свободного водорода и HCl из газовой фазы SO_2 растворяется в конденсированной воде, образуя сернистую кислоту, которая быстро переходит в серную кислоту с последующим образованием сернокислых минералов.

При понижении температуры фумарол до 100°C и ниже вулканическим газом в них является CO_2 и, возможно, незначительное количество остаточной магматической воды.

Полезная вулканическая деятельность

Чтобы не создалось впечатления, что вулканическая деятельность приносит только бедствия, следует привести, не вдаваясь в подробности, краткие сведения о некоторых ее полезных сторонах.

Так, взрывные извержения выбрасывают огромные массы вулканического пепла, который обновляет почву и делает ее более плодородной. Особенно полезны для почвы пеплы Везувия, богатые калием (до 7% K_2O). О значении этого вулканического продукта свидетельствует сравнение плотности населения на островах Борнео и Ява, расположенных почти в одинаковых климатических условиях. На Борнео плотность населения примерно 1 человек, а на Яве — свыше 600 человек на 1 км². 35 действующих вулканов, находящихся на Яве, из которых 20 — достаточно активные, периодически обновляют и удобряют почву, в то время как на Борнео почва разрушается и смывается дождями.

Выделяющиеся в вулканических областях пары воды и газы, пароводяные смеси и горячие ключи стали источниками геотермической энергии. Издавна глубинное тепло Земли использовалось для приготовления пищи. С 1904 г. в Италии оно применяется для получения электроэнергии, а также некоторых химических продуктов, выносимых газами и горячими водами.

В последующие годы были построены и строятся в настоящее время на геотермальной энергии электростанции в Новой Зеландии, в СССР на Камчатке, и в некоторых других странах. С 1930 г. глубинное тепло используется в Исландии для теплофикации города и обогрева теплиц.

С вулканической деятельностью связаны многие минеральные источники, которые используются в бальнеологических целях.

Продукты непосредственной вулканической деятельности — отдельные лавы, пемзы, перлит и другие находят применение в строительной и химической промышленности. С фумарольной и гидротермальной деятельностью связано образование некоторых полезных ископаемых, таких, как сера, киноварь (сернистая ртуть) и ряд других. Вулканические продукты подводных извержений являются источниками накопления полезных ископаемых железа, марганца, фосфора.

Изучение современной вулканической деятельности имеет важное теоретическое значение, так как помогает понять процессы и явления, происходившие на Земле в давние времена.

Вулканические сооружения

Внешние формы вулканических сооружений зависят от состояния, в котором появляется лава на земной поверхности (жидкого, пластичного или твердого), характера проникновения и выхода (спокойное излияние, выжимание, разбрызгивание и раздробление на мелкие обломки), количественных соотношений текущей лавы и обломочного материала, от силы и направления ветра, от атмосферных осадков, но главным образом от вязкости лавы и характера извержений.

В зависимости от преобладания в вулканических сооружениях лав или лавовых обломков, а также наличия в значительных количествах тех и других соответственно образуются лавовые, обломочные и смешанные сооружения.

В течение жизни вулкана его форма может изменяться вследствие изменения химического состава лавы. В истории отдельных вулканических очагов такая прямая связь существует, однако более закономерна связь между формами лавовых вулканических образований, вязкостью лавы и ее количеством. Маловязкие основные, преимущественно базальтовые, горячие лавы, бедные выделяющимися газами, изливаясь из трещин, затопляют окружающую местность, образуя обширные лавовые покровы. Изливаясь же из центрального канала и растекаясь во все стороны, они постепенно формируют благодаря повторным излияниям пологие вулканы, похожие по своей форме на щит. В них обломочного материала мало или нет совсем, так как почти отсутствуют взрывы. На границах отдельных потоков местами находятся скопления обломков — прослойки аа лавы, которые не являются продуктами взрыва.

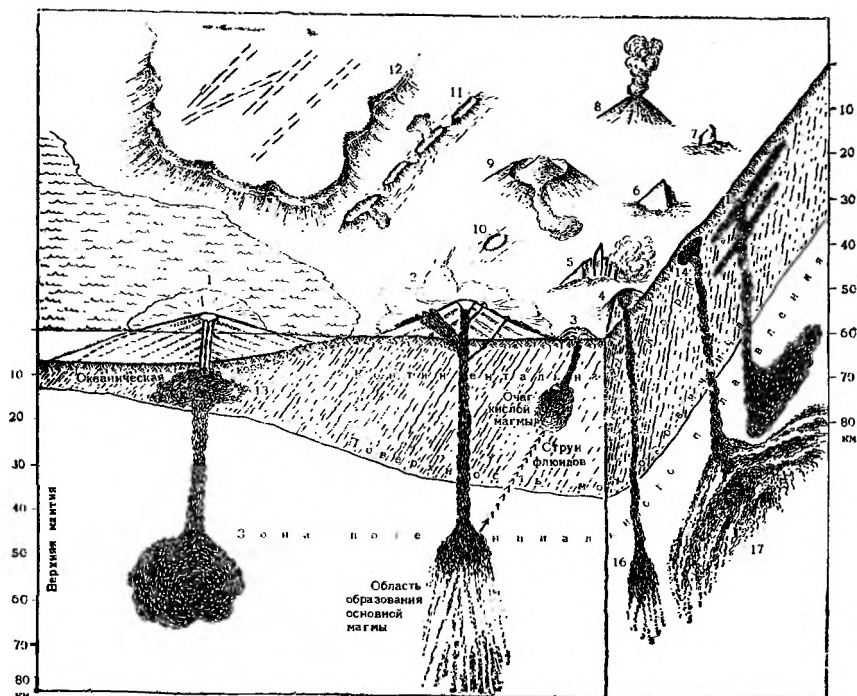
Мощность потоков лавы сравнительно небольшая, в среднем около 5 м, наклон склонов небольшой. Так, у вулкана Мауна-Лоа в нижних его частях 4—6°, а в верхней — 11°. Высота его над уровнем моря 4170 м, а над дном океана свыше 9000 м. На вершинах таких щитообразных вулканов находятся кратеры, наподобие колодцев, с отвесными стенами, расположенные в кальдерах, если они образовались на вершинах этих вулканов.

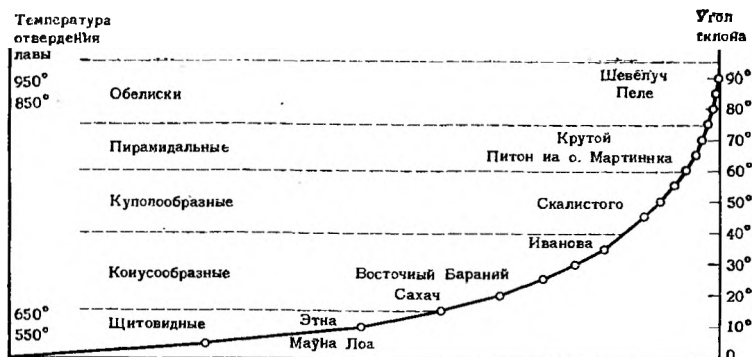
Несколько отличаются от гавайских вулканов щитообразные вулканы Исландии. Относительная высота их редко достигает 1 км, а часто и меньше. Угол наклона склонов несколько больше. На вершинах кратер окаймлен валом, возникшим, по мнению одних, в результате переполнения кратера лавой и одновременного излияния ее через все стенки кратера, по мнению других, — в результате фонтанирования лавы.

Лавы средней вязкости (преимущественно андезиты и дациты), если их много, образуют крупные купола и купола с лавовыми языками, а при малом количестве — малые купола. По внутреннему строению купола бывают скалистые из выжатой почти отвердевшей лавы и веерообразные или луковичные, если лава находится еще в

Схематическая блок-диаграмма вулканов и гипотетического строения их корней

1 — щитообразный; 2 — конусообразный стратовулкан; 3 — куполообразный; 4 — купол пью де домского типа; 5 — скалистый купол с обелиском; 6 — питон; 7 — башенный тип Атакора; 8 — конусообразный насыпной; 9 — вулкан в вулкане; 10 — маар; 11 — кратеры на трещине; 12 — лавовые покровы (плато), излившиеся из трещин; 13 — периферический очаг; 14 — лакколлит; 15 — пластовая залежь; 16 — магматические очаги; 17 — батолит





Схематическая диаграмма углов склонов лавовых вулканов

несколько пластичном состоянии. Высота куполов колеблется от нескольких десятков метров до 1000 м и более, чаще всего — от 100 до 300 м, диаметр их основания — в 2—3 раза больше высоты.

Очень вязкая лава (в основном дациты и риолиты) при относительно большом ее количестве и значительном диаметре канала образует сооружение пирамидальной формы — питон с максимальной высотой до 1200 м, а при сравнительно малом диаметре — обелиски высотой 100—350 м.

В природе нет идеальных форм щитов, конусов, куполов, так как под воздействием различных факторов они более или менее изменяются. Хорошее представление о форме наземного вулкана дает его профиль или кривая линия, являющаяся его образующей, хотя вулкан и не имеет строгой линии склона.

Лавовые вулканические сооружения центрального типа в зависимости от общего угла склона разделяются на щитообразные, конусообразные, куполообразные, пирамидальные и обелиски. Границами этих групп является угол склона: между щитообразными и конусообразными вулканами — от 10 до 15°, между конусообразными и куполообразными — от 35 до 40°, между куполообразными и пирамидальными — от 60 до 65°, а более крутые вулканические сооружения, имеющие угол склона более 75°, следует относить к обелискам.

На схематической диаграмме углов склонов лавовых вулканов получена эмпирическая кривая, приближающаяся по своей форме к параболе и указывающая на существование определенной зависимости между формой вулкана и всеми факторами, влияющими на нее, из которых самым главным является вязкость лавы.

Можно сделать вывод, что между углом образующей, которая характеризует форму лавового сооружения, и температурой застывания лавы существует некоторая связь, выражающаяся в том, что чем выше температура отвердевания лавы, тем круче и короче склон и, наоборот, чем ниже температура отвердевания лавы, тем меньше угол образующей и длиннее склон. Однако, по-видимому, круче 70° ни жидкая, ни пластичная лавы не могут образовать вулканическую форму рельефа. При возникновении таких крутых форм выжимаемая лава должна быть уже твердой.

Вулканические сооружения, образующиеся в результате одновременных излияний лавы и ее взрывов или чередования излияния лав с выбрасыванием обломочного материала, или накоплением рыхлого материала, выбрасываемого только взрывными извержениями, имеют в большинстве случаев конусообразную форму с углами наклона, зависящими от размеров обломков: песка, лапиллей и глыб. При падении песка вблизи кратера он стремится занять положение, соответствующее углу естественного откоса. При падении же и накоплении более крупных глыб формируется более крутой склон.

Эти конусообразные вулканы отличаются друг от друга главным образом своим внутренним строением. Когда количество лав превышает количество рыхлого пирокластического материала, вырастает «слоистый вулкан», при их равных или близких к равным соотношениях образуется «стратовулкан», а при значительном преобладании пирокластического материала — «насыпной вулкан».

Кроме крупных вулканических форм, существуют и малые вулканические формы. К ним относятся горнитосы — небольшие с крутыми склонами сооружения высотой в несколько метров, возникающие на лавовых базальтовых потоках вследствие выброса выделяющимися газами комков жидкой лавы; тумули — пологие невысокие холмы, сложенные часто плоскими глыбами, появляющимися на лавовых потоках под влиянием давления еще.

текущей под коркой лавы из расположенного выше кратера (их называют также бескорневыми куполами).

Вышеприведенные вулканические формы относятся к простым. Однако бывают и сложные формы, возникновение которых связано со значительными перерывами в деятельности вулканов или с изменением состава лав и характера извержений. К ним относятся двойные вулканы, обычно называемые вулканами типа сомма-везувий, представляющие собой вулкан в вулкане, хребтообразные вулканы, формирующиеся в результате небольшого перемещения выводного канала, стратовулканы, увенчанные крупными, почти чисто лавовыми, слоистыми вулканами или куполами различных размеров.

Особый вид и происхождение имеют исландские вулканические столовые горы. По форме они изолированные с плоскими вершинами и крутыми склонами. Они сложены главным образом палагонитом, т. е. стекловатой породой базальтового состава с относительно значительным содержанием в ней воды, и подушечными лавами.

По мнению Г. Кьяртанссона, подледниковые извержения палагонита и подушечных лав создали основание для этих гор. Затем, после того как от последующих извержений и постепенного накопления упомянутых пород ледник расплавился до самой своей поверхности, извержения стали наземными (субаэральными), и изменился характер самих извержений. Начали изливаться нормальные лавовые потоки, покрывавшие столовые горы. В течение всего процесса, пока ледник не растаял, вулканический материал накапливался внутри ледника и принял форму, более или менее близкую к современной форме столовых гор.

С вулканической деятельностью связано не только образование указанных вулканических сооружений, которые можно объединить в группу положительных вулканических форм рельефа, но и возникновение отрицательных вулканических форм. Последние образуются под влиянием весьма сильной взрывной деятельности, сопровождаемой обвалами вследствие боковых излияний лав и в результате эрозионной и дефляционной деятельности (последние две не связаны с вулканической деятельностью).

Под воздействием давления расширяющихся при выходе из канала газов часто на вершине вулкана образуется кратер. Обычно он представляет собой углубление в



Кратер Этны



Вулкан Стромболи с шаррой

виде чаши круглого или овального сечения с крутыми или наклонными зазубренными наверху стенами, постепенно суживающимися книзу. Иногда стенки переходят в вулканический капал, но большей частью упираются в плоское или бугристое дно. Размеры диаметра кратера от десятков метров до нескольких километров. Воронкообразное углубление, окаймленное валом из обломков прорванных пород, возникшее в результате единичного взрывного извержения, называют мааром.

Из других отрицательных вулканических форм рельефа наибольшее внимание привлекли кальдеры — большие, до нескольких десятков километров в поперечнике, впадины с крутыми или даже отвесными стенками. Термину кальдера (в переводе с испанского — котел) давали различное толкование. Одни исследователи употребляли этот термин главным образом в морфологическом, другие — в генетическом смысле.

Много приверженцев имела взрывная гипотеза происхождения кальдер. Они считали, что кальдера и кратер возникают одинаковым путем, разница лишь — в размерах впадины и, следовательно, в силе взрывного извержения. Вулканические впадины диаметром до 2 км относили к кратерам, а больше — к кальдерам. Другие полагали, что в результате очень сильных взрывов выбрасывалась цилиндрическая сердцевина. Затем стенки ее скользили и обваливались. Так появлялись большие впадины — кальдеры.

Ряд исследователей объясняют формирование кальдер обрушением кровли над неглубоко залегающим магматическим очагом, которое происходит вслед за удалением магмы или понижением ее уровня в очаге.

Существовал еще ряд предположений о происхождении кальдер. Однако лишь одни взрывы не могут быть причиной образования таких крупных кальдер, как Асо (Япония) — размеры ее 18×25 км. Различие между кальдерой и кратером должно определяться не их относительными размерами, а генетическими признаками. В последнее время А. Р. Мак-Бирней и Х. Уильямс пришли к выводу, что существуют две группы кальдер. Одни из них связаны с очень большими по объему выброшенного материала взрывными извержениями кислой магмы, другие — с эффузивными извержениями базальтовой магмы.

**Ряд боковых кратеров
на радиальной трещине
Ключевского вулкана
(фото Н. К. Классова)**



**Радиальная дайка на
вулкане Острый
Толбачик, заполнившая
трещинный канал
(фото В. Ф. Попкова)**



Первые возникают в результате обрушений, происшедших вслед за извержениями центрального типа с обильным пемзопадом и пемзовыми потоками (тип Кракатау); оттока магмы с выбросом громадного количества кислого пирокластического материала по трещинам, расположенным в теле вулкана (тип Катмаи); выделений колоссальных объемов пепла и пемзы кислого состава из дугообразных трещин, не связанных с ранее существовавшими вулканами (тип Веллес).

Вторые образуются после громадного излияния базальтовой магмы путем обвалов по частям на площади, значительно более обширной, чем площадь, занимаемая ранее существовавшим вулканом (тип Масайи); от обвалов, происходящих в течение последних стадий роста обширных базальтовых щитообразных вулканов. Вследствие их подъема происходит образование круто наклоненных кольцевых трещин, по которым из-за оттока магмы в трещиноватые (рифтовые) зоны с боковыми излияниями или без них оседает вершинная часть вулкана (гавайский тип). Удаление магмы и обрушение происходят путем внедрения ее в горизонтальные трещины и извержения лав по круговым периферическим разломам вблизи вершины вулкана (галапагосский тип).

Происхождение кальдер обрушением подтверждают весьма интересные непосредственные наблюдения Т. Симкина и К. Ховарда одновременно с геофизическими исследованиями оседания в кальдере вулкана Фернандина на Галапагосских островах во время его извержения в июле 1968 г.

Извержение началось в мае излияниями лавы на восточной стороне вулкана, а 11 июня произошел выброс насыщенного вулканическим пеплом облака. С этого дня сейсмическая активность увеличивалась изо дня в день и достигла максимальной 18 и 19 июня. Сейсмографы, расположенные в 140 км от вулкана, записывали около 200 землетрясений в день. Подобная частота землетрясений отмечалась и 23 июня.

В результате этого извержения дно кальдеры площадью 7 км² опустилось вдоль эллиптической трещины неравномерно. От северо-западного конца дна, которое почти не опустилось, смещение его постепенно увеличивалось и достигло примерно 300 м в юго-восточном конце.

На дне образовалось очень мало трещин, а на внешнем склоне кальдеры они наблюдались на протяжении 0,5 км от ее края. Только часть западной стены кальдеры и ее дна площадью 0,5 км², где ранее отмечалась фумарольная деятельность, опустилась на 50—150 м как самостоятельная глыба. Несмотря на эту трещиноватость, в кальдере не было никаких признаков свежей лавы и, судя по гидрофонным наблюдениям, не происходили подводные извержения.

Учитывая, что объем извергнутого пепла был почти в 1000 раз меньше, а объем лавового потока, излившегося на восточной стороне вулкана, был по крайней мере в 10 раз меньше объема обрушившейся части дна, ученые пришли к заключению, что обрушение дна кальдеры, расположенной в предполагаемой активной океанической зоне разломов, связано с оттоком магмы на глубину этих трещин.

Можно соглашаться или не соглашаться с мнением этих исследователей об оттоке магмы в глубины трещин, но во всех случаях их наблюдения подтверждали образование кальдер в результате обрушения.

В вулканических областях находятся огромные впадины с прямолинейными или прямолинейно-овальными контурами, названные Р. В. Ван-Беммеленом вулкано-тектоническими депрессиями. Возникают они вследствие ряда грубо параллельных продольных и поперечных разломов, а также колоссальных извержений по ним пемзы и рыхлого вулканического материала. Наглядным примером является озеро Тоба на Суматре. Вероятно, Курильское озеро и Авачинский залив на Камчатке того же происхождения.

Что такое вулканы?

Казалось бы, этот вопрос нужно ставить в начале книги. Однако она построена, как можно было заметить, по принципу от возможных причин к следствию, а вулканы являются следствием ряда причин.

Термин «вулкан», впервые введенный в древнеримском государстве, означает гору, извергающую огненно-жидкую лаву. В русских книгах XVIII в. применялся термин «огнедышущая гора», а не вулкан. В японском, монгольском и некоторых других языках существует понятие

«огненная гора» и не употребляется слово вулкан. В настоящее время к вулканам относятся как действующие, так и потухшие, как современные, так и древние. По существу же в сочетании слов: «действующий вулкан» есть тавтология, ведь вулкан — это действующая, извергающая лаву гора. В зарубежной литературе о действующих вулканах часто пишут «вулкан-гора Везувий», «вулкан-гора Пелее» и т. д.

Что же означает термин «вулкан»? Оказывается, разные исследователи вкладывают в него односторонний, порой противоположный смысл. Вот некоторые из таких определений:

1. Вулкан — это гейзер, в котором движущей силой являются пары воды (С. Аррениус).

2. Вулкан — это место, где происходят извержения (А. Штюбель).

3. Вулкан — это аппарат, через который Земля периодически теряет тепло (Г. Тиррель).

4. Вулкан — это окно, благодаря которому мы познаем состав глубинного вещества (Г. Макдональд).

5. Вулкан — это место на поверхности Земли, где магматический материал извергается или извергался в прошлом (А. Риттманн).

6. Вулкан обычно образует гору более или менее конической формы с кратером на вершине (А. Шифердеккер).

7. Горы, извергающие огонь, дым, мелкие обломки пород и изливающие лаву — расплавленную каменную породу, называются вулканами (В. А. Обручев).

8. Вулкан — экструзивная форма, являющаяся следствием центрального извержения (Б. Эшер).

9. Вулкан можно определить как устье канала, через которое постоянно или периодически из земных недр выбрасываются наружу вещества, имеющие очень высокую температуру (Э. Ог).

10. Вулканы представляют собой геологические образования, связанные с вулканической деятельностью и расположенные над отверстиями или трещинами, через которые извергаются на поверхность магматические продукты. Чаще всего вулкан представляет собой гору или холм, образованные из этих продуктов (М. Жуков, В. Славин, Н. Дунаева).

Существуют и другие определения, то краткие, то бо-

лее полные, но в каждом из них должны учитываться все важные и характерные особенности вулканов.

Главные составные части вулкана — магматический очаг и канал, идущий от очага к поверхности Земли. Очаг является корнем, от которого тянется ствол-канал, а от последнего вблизи земной поверхности у некоторых вулканов отходят, подобно ветвям дерева, боковые каналы. В зависимости от состава вулканических продуктов и типа извержений образуются вулканические сооружения различной формы.

Следовательно, вулкан является сооружением, состоящим из трубообразного или трещинного канала (соединяющего магматический очаг с земной поверхностью) одиночного или с боковыми ответвлениями. Над их выходами периодически накапливается лава или ее обломки, выносящие из недр и теряющие тепло Земли и принимающие различные морфологические формы, которые зависят в значительной степени от вязкости лавы и типа извержений. Над верхней частью канала — жерлом — находится чашеобразное углубление — кратер.

Можно дать вулкану и несколько иное определение, а именно: вулкан является местом более интенсивных выделений внутренней (главным образом тепловой) энергии Земли на ее поверхность в точке и системе точек, расположенных линейно, линией и системой линий, происходящих большей частью периодически вместе с излиянием или выжиманием лав, с выбросами обломочного лавового и нелавового материала, с выдуванием и выделением газов и паров воды.

Распределение вулканов на Земле

В начальной стадии развития Земли вулканы, по всей вероятности, находились во многих местах ее поверхности, но затем они стали возникать вдоль определенных поясов, огромных разломов Земли. Такая закономерность сохраняется и в наше время. Например, на территории нашей страны вулканы действовали геологически очень давно, а в палеозое, около 400—250 млн. лет тому назад, они образовались и действовали вдоль полосы, простирающейся с севера на юг почти на 2000 км, называемой ныне Уральским хребтом.

Таблица 4

Местонахождение вулканов	Вулканы					Наиболее активные вулканы по частоте или по силе извержений
	Извергавшиеся в историческое время			Находящиеся в сольфатарной стадии	Всего	
	датированные		недатированные			
	наземные	подводные				
Тихоокеанский пояс						
Камчатский п-ов	19	—	1	8	28	Ключевской, Карымский, Шивелуч, Безымянный, Ксудач
Курильские о-ва	32	2	2	4	40	Пик Сарычева, Аланд
О-ва Хоккайдо, Хонсю, Кюсю, Рюкю	38	2	—	15	55	Асо, Асама, Таруман, Кирисима, Сакура-дзима
Изу-Марианские о-ва	12	8	—	2	22	О-сима, Мияке-дзима
О-в Тайвань и к северо-востоку от него	—	5	—	3	8	—
Филиппинский архипелаг	14	2	2	15	33	Майон, Тааль, Катарман
Южно-Китайское море	—	2	—	—	2	—
О-ва Санги	3	2	—	—	5	Апи Сваю
О-в Целебес	6	—	1	4	11	Сопутан
О-в Хальмахера	6	—	1	1	8	Пик Тервейт
О-в Новая Гвинея	4	—	—	6	10	Ламингтон
О-ва к северо-востоку от Новой Гвинеи	5	1	1	1	8	Манам
О-ва Адмиралтейства	1	—	—	—	1	Тулуман
О-ва Новая Британия	6	—	—	11	17	Рабаул
Соломоновы о-ва	2	2	—	5	9	Багана
О-ва Санта-Крус	1	—	—	—	1	Тинакула
О-ва Новые Гебриды	5	3	1	1	10	Амбрим, Исоур

Таблица 4 (продолжение)

Местонахождение вулканов	Вулканы					Наиболее активные вулканы по частоте или по силе извержений
	Извергавшиеся в историческое время			Находящиеся в сольфатарной стадии	Всего	
	датированные		недатированные			
	наземные	подводные				
О-ва Матью и Хантер	1	—	—	1	2	—
О-ва Самоа	3	1	—	—	4	—
О-ва Тонго	4	7	—	—	11	Ниуафо'у, Фалкон
О-ва Кермадек	1	3	—	1	5	Раул
Новая Зеландия	6	—	1	—	7	Нгаурухоа, Таравера
Антарктика	9	2	—	11	22	Эребус
О-ва Хуан-Фернандес	1	2	—	1	4	—
Галапагосские о-ва	9	—	—	2	11	Фернандина, Вольф
Южная Америка (Чили)	27	—	11	11	49	Льямма, Ласкар, Тупунгатито
Южная Америка (Перу)	5	—	4	—	9	Убинас
Южная Америка (Эквадор)	8	—	—	—	8	Сангай, Котопакси, Ревентадор
Южная Америка (Колумбия)	7	—	2	4	13	Галерас, Пурасе
Центральная Америка (Коста-Рика)	7	—	—	1	8	Поас, Иразу
Центральная Америка (Никарагуа)	11	—	—	—	11	Серро Negro, Концепсион, Косегуина
Центральная Америка (Сальвадор)	7	—	1	3	11	Изаильо, Сан-Мигуель
Центральная Америка (Гватемала)	8	—	—	3	11	Фуего
Центральная Америка (Мексика)	11	—	—	2	13	Колима, Попокатепетль
Северная Америка	9	—	2	1	12	Лассен-пик

Таблица 4 (продолжение)

Местонахождение вулканов	Вулканы					Наиболее активные вулканы по частоте или по силе извержений
	Извергавшиеся в историческое время			Находящиеся в сольфатарной стадии	Всего	
	датированные		недатированные			
	наземные	подводные				
П-ов Аляска	14	—	2	3	19	Павлов, Катмаи
Алеутские о-ва	26	—	—	2	28	Акутан, Макушин, Шишалдин
	328	44	32	122	526	
Средиземноморско-Зондский пояс						
О-в Баррен	1	—	—	—	1	—
О-в Суматра	13	—	—	13	26	Марапи, Демпо
О-в Кракатау	1	—	—	—	1	Кракатау
О-в Ява	22	—	—	13	35	Мерапи, Келуд, Семеру, Бромо, Раунг, Ломонган, Слангет, Гунтур, Гедех, Галунггунг
Малые Зондские о-ва	19	1	—	6	26	Тамбора, Агунг, Батур, Лесотоби, Лакилакн
Море Банда	6	2	—	1	9	Банда Апи
Юго-Западная Азия (Иран)	—	—	—	3	3	—
Кавказ	—	—	—	1	1	—
Малая Азия (Турция)	2	—	—	1	3	—
Эгейское море	3	—	—	2	5	Санторин
Апеннинский п-ов, о-ва Липарские и Сицилия	8	4	1	1	14	Стромболи, Этна, Везувий
	75	7	1	41	124	
Атлантический пояс						
О-в Ян-Майн	1	—	—	1	2	—
Исландия	27	5	8	—	40	Гримсвёти, Катла, Гекла, Лаки
Северная Атлантика	—	4	—	—	4	—
Азорские о-ва	5	5	—	2	12	Пик у, Файял
Канарские о-ва	3	—	—	—	3	Тенериф

Таблица 4 (окончание)

Местонахождение вулканов	Вулканы					Наиболее активные вулканы по частоте или по силе извержений
	Извергавшиеся в историческое время			Находящиеся в сольфатарной стадии	Всего	
	датированные		недатированные			
	наземные	подводные				
Зеленый мыс	1	—	—	—	1	Фогу
Экваториальная Атлантика	—	5	—	—	5	—
О-ва Тристан-да-Кунья и Буве	2	—	—	—	2	—
	39	19	8	3	69	
Восточно-Африканский пояс						
Восточная Африка	13	—	6	18	37	Эрта-Але, Олдонно Ленгаи, Телки
Центральная Африка	3	—	—	—	3	Ньямурагира, Ньярагонго
	16	—	6	18	40	
Гавайские о-ва	4	1	—	—	5	Килауэа, Мауна-Лоа
Континентальная Азия	5	—	1	—	6	—
Индийский океан	4	—	—	1	5	Питон де ля Фурнес, Картала
Аравийский п-ов	13	—	1	5	19	—
Красное море	2	—	—	—	2	—
Западная Африка	1	—	—	—	1	Камерун
Тибести (Сахара)	—	—	—	2	2	—
Дарфур (Судан)	—	—	—	1	1	—
Малые Антильские о-ва	6	3	—	8	17	Пеле
	35	4	2	17	58	
	493	74	49	201	817	

Несколько позже, в мезозое, начали возникать вулканы в полосе Кавказ — Крым — Карпаты. И на Кавказе, и в Карпатах они с перерывами действовали почти до настоящего времени. Подобные вулканические пояса имеются во многих местах Земли.

Такая же характерная особенность отличает и расположение современных вулканов. На территории Советского Союза они размещаются в полосе, идущей по Камчатке, Курильским островам и затем вокруг Тихого океана, образуя Тихоокеанский круговой вулканический пояс, или, как часто его называют, Тихоокеанское огненное кольцо. В Атлантике современные вулканы находятся в несколько извилистом поясе, идущем от островов Ян-Майн и Исландии на севере до острова Тристан-да-Кунья на юге, а также в Средиземноморско-Зондском поясе, начинающемся в Италии и оканчивающемся яванской дугой.

Действующие вулканы есть и в Восточно-Африканском рифтовом поясе, находящемся на африканском материке, в отличие от всех предыдущих, расположенных вблизи морей и океанов.

Кроме упомянутых длинных вулканических поясов, вулканы размещены и на относительно коротких, например Гавайский пояс в Тихом океане, Западно-Африканский и некоторые другие.

Если же учитывать вулканические пояса различной протяженности, в которых вулканы действовали недавно — от десятков тысяч до первых миллионов лет, то число таких поясов значительно увеличится: Оверни, Аравийский, Саянский — от Гувы до Забайкалья и др.

С 1500 г. до н. э. по 1973 г. насчитывается 817 действующих в историческое время вулканов (табл. 4). Весьма вероятно, что за последние 3 тыс. лет их действовало больше. Определение абсолютного возраста радиоуглеродным методом позволит более точно установить возраст совсем недавно действовавших, но ныне находящихся в состоянии покоя вулканов.

Необходимо также иметь в виду, что большое количество вулканов расположено на дне океанов, особенно в Тихом океане. Среди них есть и действующие, которые из-за глубокого залегания очень трудно выявить и, следовательно, учесть.

При объединении вулканов по поясам видно, что наибольшее их количество (почти 80%) сосредоточено в тихоокеанском круговом вулканическом поясе, а затем в Средиземноморско-Зондском широтном поясе.

Размещение вулканов на земной поверхности тесно связано с геолого-тектоническим строением Земли с ее подвижными, механически ослабленными областями. Вулканические пояса почти везде совпадают или близки к сейсмическим поясам — местам, порой очень интенсивных землетрясений.

Вулканы расположены, с одной стороны, в зонах горообразования, где опускание земной коры сменилось ее поднятием, благодаря чему в этих зонах земная кора разбита многочисленными трещинами. Они-то и помогают лаве прорваться на поверхность. С другой стороны, вулканы находятся в поясах крупных параллельных трещин, связанных с образованием грабенов, называемых рифтовыми зонами. Примером могут служить вулканы, расположенные в Восточно-Африканской рифтовой зоне.

Все это указывает на тесную связь проявлений вулканизма с особо подвижными зонами Земли.

ПРЕДВИДЕНИЕ И ЗАЩИТА

Вулканы с точки зрения их активности и возможности извергаться можно разделить на три группы: на действующие, об извержениях которых в течение последних двух тысячелетий имеются документальные данные; на вулканы, которые, предположительно, извергались в историческое время; и на вулканы потухшие — бездействующие тысячелетиями. Если первая категория вулканов является определенно опасным врагом, то вторая и особенно третья категории представляют большие трудности для выявления их способности извергаться.

То, что вулканы находятся в состоянии покоя столетиями и даже тысячелетиями, еще не означает, что они окончательно потухли. После длительного покоя могут вновь начаться извержения. Такие вулканы особенно опасны в густо населенных вулканических областях. В связи с этим, естественно, возникает необходимость бороться с губительными воздействиями катастрофических извержений.

Прежде чем перейти к мерам, которые следует предпринимать для защиты от возможных страшных последствий при извержениях, следует особо остановиться на характере вулканических явлений, которые могут их вызвать. Так, лавовые извержения способны причинить колоссальный ущерб населению и народному хозяйству своей массой — разрушать различные постройки, заливать поля и населенные пункты, сооружения, а своим теплом сжигать деревянные сооружения, леса, сады, вызывать взрывы воды в колодцах и т. п.

Лавовые потоки текут очень быстро по крутым или относительно крутым склонам и очень медленно по пологим, обычно уничтожая только то, что находится на их пути, но в непосредственной близости от них все более или менее остается в целости.

Однако история Земли знает периоды ее жизни в геологическом прошлом, когда излияния основных лав происходили из многочисленных трещин на больших, даже на огромных площадях, о которых речь шла выше. Такие чрезвычайно редкие извержения очень опасны, особенно в густонаселенных областях. В историческое время они не происходили.

Взрывная деятельность выражается в выбросах от незначительных до огромных количеств вулканических глыб, мелких обломков — лапиллей, песка и пыли — объемом до нескольких кубических километров на высоту от сотен метров до нескольких десятков километров.

Обычно эти продукты распределяются закономерно: глыбы и лапилли вблизи кратера, а вулканические пески и пыль — дальше от него, причем место оседания последних зависит от направления жерла вулкана и ветра. В период безветрия песок и пыль оседают вокруг кратера, а при очень сильном ветре — полосой в виде треугольника, длина которой зависит от силы ветра. В различных слоях атмосферы движение и оседание вулканического песка и пыли представляют более сложную картину, зависящую от направлений воздушных течений. Очень сильный ветер, препятствуя оседанию вулканических песка и пыли на небольшой площади, разносит их часто на огромные пространства.

Вулканические пески и пыль, образующиеся из огненно-жидкой лавы, в полете значительно остывают, в то время как у вулканических бомб и глыб, которые могут улететь на расстояние до нескольких километров от кратера, остывает только наружная оболочка, а внутренние части остаются еще раскаленными.

Такие бомбы и глыбы, падая на постройки, особенно деревянные, и лес, могут вызвать пожар. Вулканические же песок и пыль причиняют бедствия главным образом своей массой, засыпая дома, сады, пашни, а также вызывая отравление содержащимися в этих продуктах удушающими газами. Если в желудок человека попадают мелкие угловатые обломки минералов и вулканического стекла, они неизбежно вызывают кровотечение.

При экзтрузивной деятельности наблюдаются раскаленные тучи направленного и прямого взрыва, горячие лавины и агломератовые потоки, которые чаще всего связаны с образованием куполов.

Поле воздействия раскаленных туч — относительно узкая полоса длиной до 10 км и шириной от нескольких сотен метров до 1—2 км, агломератовых потоков — от 2—4 до 15—20 км, горячих лавин — в зависимости от рельефа. Последние обычно движутся, подчиняясь силе тяжести, по впадинам данной местности на протяжении нескольких километров. Только при очень крутых склонах вулкана лавины могут перескакивать из одной ложбины в другую.

Движения раскаленных туч направленного взрыва не подчиняются силе тяжести. Вырвавшись из канала вулкана, такие тучи стелются по склону и одновременно подымаются ввысь, имея начальную температуру 200—800°, движутся со скоростью 25—150 м/сек. Они отличаются обилием «самовзрывающихся» гигантских глыб, песка и газов, которые наносят ущерб своей массой (засыпают здания), теплом (сжигают поселения) и ядовитыми свойствами газов (вызывают отравления и смерть).

Значительные выделения и выдувания вулканических газов происходят почти при всех извержениях, за исключением извержений очень жидких лав гавайского типа.

Вулканические газы выдуваются в свободном состоянии, но они находятся и в порах лав, глыб, лапиллей и песка. Некоторые газы находятся в концентрациях, вредных для жизни человека, животных и некоторых растений. Допустимые разовые концентрации газов для человека следующие (в мг/м³): HCl — 0,2; HF — 0,02; SO₂ — 0,5; H₂S — 0,008; CO — 3,0; CO₂ (только для помещений) — 0,05; среднесуточная норма: HCl — 0,2; HF — 0,005; SO₂ — 0,05; H₂S — 0,008 и CO — 1,0. Излишняя концентрация газов, особенно сернистых, вредно влияет на животных и растения. Во время взрывного извержения Авачинского вулкана в 1945 г., продолжавшегося всего 7 час., погибли мелкие птицы и мышевидные грызуны, полностью были уничтожены камчатская и белая березы, лиственница и другие растения. Однако, как отмечает И. Е. Кабанов, пока неясно, произошла ли гибель растений от отравления через ассимилирующий орган или через корневую систему, куда поступают растворенные в воде газы, или от обеих причин.

Эксплозивный, эффузивно-эксплозивный и экструзивный виды деятельности могут вызвать грязевые потоки. Они возникают: 1) при eksploзивных извержениях из



Здания, засыпанные пеплом во время извержения вулкана Сакура-дзима в 1914 г. (фото Ф. Перрета)

кратеров, заполненных водой, снегом или льдом; 2) при подледниковых извержениях; 3) от сильного дождя во время эксплозивного извержения; 4) в результате сильного ливня, смывающего со склонов вулкана рыхлые отложения, образовавшиеся в результате предшествующих эксплозивных или экструзивных извержений; 5) вследствие быстрого таяния снега и льда; 6) в результате разрушения части стен кратерных озер. Первые три способа образования грязевых потоков имеют прямую связь с вулканическими извержениями, последние же три лишь косвенно с ними связаны.

Грязевые потоки вообще и горячие в частности, вызванные внезапными взрывными извержениями, приводят, как уже говорилось, к очень страшным последствиям, опустошая большие площади и уничтожая на них все живое.

Грязевые потоки движутся с большой скоростью, поэтому изучение их весьма важно для правильного размещения жилых зданий. Возводить постройки необходимо с учетом мест, где невозможно движение грязевых потоков. Скорость их (от 77 до 40 км в час) зависит главным образом от плотности грязи и угла наклона местности.

Японский исследователь С. Накамура предложил ряд уравнений для определения скорости движения грязевого потока на различных участках склона вулкана Токати (Япония). Были подсчитаны приблизительные промежутки времени, в течение которых грязевой поток протекал по различным частям склона (табл. 5).

Таблица 5

Длина участка склона, км	Средняя скорость, м/сек	Время пробега, сек.	Промежутки времени между взрывом и прибытием грязевого потока, мин.
2,4	42	57	Около 1
4,0	26	154	3,5
13,6	16	850	17,7
3,3	5	660	28,6

При извержении подводных вулканов, а также вулканов, которые образуют относительно небольшие острова или расположены вблизи берега моря, могут возникнуть цунами, приносящие огромные бедствия народному хозяйству и людям, живущим на побережьях.

В связи с подводными извержениями, с одной стороны, происходят вулканические землетрясения, а с другой — взрывы, вслед за которыми в подводном кратере и канале появляется пустота. Сюда со всех сторон и устремляется вытолкнутая взрывами и землетрясениями морская вода. В кратере получается ее избыток, и она подымается вверх, образуя в зависимости от масштабов землетрясений или извержений волны цунами.

Цунами возникают также в результате оползней и обвалов прибрежных и подводных частей вулканов или в подводных ущельях. Следует иметь в виду, что цунами обычно не одна волна, а несколько. Вдали от берегов, будучи очень пологой, она незаметна, но вблизи берегов, коснувшись дна моря или океана, становится высокой, грозной, страшной движущейся стеной, несущей на побережье смерть и разрушение.

При извержении вулкана Севергина на Курильских островах в 1934 г. образовалась волна высотой 9 м. При извержении вулкана Кракатау в 1883 г. волна у берегов Явы достигла 20 м, а в некоторых пунктах — 35 м.

Итак, источниками бедствий, приносимых вулканическими извержениями, являются следующие.

I. Лавовые образования:

1) Лавовые потоки и поля, образующиеся базальтовыми лавами гавайского типа и вследствие малой вязкости и большой текучести распространяющиеся на большие расстояния;

2) лавовые потоки, возникающие при стромболианском типе извержений, базальтового и андезито-базальтового состава, умеренно вязкие, достаточно мощные и текущие на значительные расстояния — от нескольких до десятков километров;

3) лавовые потоки, образующиеся при вулканском типе извержений из вязкой лавы от андезито-базальтового до риолитового состава, обычно мощные, длиной от нескольких сотен метров до нескольких километров;

4) лавы при пелейском типе извержений очень вязкие, уже не способные течь и обычно воздвигающие купола, пирамиды и обелиски (опасны только в месте прорыва).

II. Пирокластические образования: отложения вулканических песка и пыли наблюдаются при вулканском, катмайском, безымянном, пелейском и стромболианском типах извержений (причем при последнем типе образуются незначительные отложения, а при первом — наиболее мощные); они покрывают большие площади в зависимости от массы выброшенного материала, силы извержения и ветра (от этих же факторов и от размеров песчинок зависит место наибольшего их оседания).

III. Раскаленные тучи, лавины и агломератовые потоки, образующиеся при пелейском, безымянном и катмайском типах вулканической деятельности.

IV. Вулканические газы, являющиеся составной частью вулканических продуктов при всех типах извержений. Особенно много их выделяется при вулканском типе и его особо богатой газами разновидности — плинианских взрывах, отчасти при пелейском типе и очень мало — при гавайском. Кроме того, необходимо иметь в виду, что фумаролы, сольфатары и в особенности мофеты, выделяющие газы не только в кратере или на склонах вулкана, но и у подножия его как перед извержением, так и после него, могут быть опасны для человека и животных.

Предвестники извержений

Большую роль для защиты людей и отчасти объектов народного хозяйства от губительных последствий катастрофических извержений вулканов играет предсказание места, времени и силы их извержений.

По частоте и периодичности извержений, происшедших в историческое время, вулканы можно расчленить на три группы. В первой периодичность является в среднем постоянной, во второй — не наблюдается и в третьей — она наблюдается в течение нескольких столетий, а затем относительно надолго наступает покой. Для первой и частично третьей групп можно предположить, что образование магмы и, по-видимому, накопление в магматическом очаге происходят с постоянной скоростью. Объяснение неперодичности извержений во второй группе пока очень неопределенное.

Полный цикл извержения, или, как чаще говорят, полный эруптивный цикл, включает в себя следующие состояния: покоя, подготовки извержения, извержения и послеизверженного состояния, переходящего в состояние покоя.

В состоянии покоя вулканический канал закрыт лавовой пробкой. В магматическом очаге находится остаточная после извержения магма, лишенная главной массы газообразных веществ, или он заполняется вновь образующейся магмой. В это время давление газов в очаге небольшое.

Подготовка к извержению может быть различной. Происходит ли в магматическом очаге ретроградное кипение или расширение вещества за счет фазовых переходов, повышение температуры или образование в кровле очага трещин, выделяющиеся при этом газы создают все возрастающее давление, в результате которого магма внедряется в вулканический канал, и, пока он закрыт лавовой пробкой, давление в нем сильно увеличивается.

Когда давление в канале превзойдет давление лавовой пробки и сил сцепления ее вещества, пробка разрушается, и начинается извержение. В зависимости от содержания газов в магме и в канале извержения бывают слабые и очень сильные, кратковременные (несколько часов и даже меньше) и очень длительные (месяцы и годы).

В некоторых случаях лавовая пробка не взрывается, а проплавляется (Ф. Перрет), вслед за чем начинается

излияние лавы. После прекращения взрывов и излияния или выжимания лавы наступает переход к состоянию покоя. В это время в вулканическом канале снова образуется лавовая пробка или из обломков пород, осыпавшихся со стенок канала, часто бьют струи фумарольных, сольфатарных и мофетных газов. Когда же обильные выделения газов прекращаются, наступает состояние покоя.

Для того чтобы предвидеть извержения, их место, время и силу, очень важно определить характер явлений, происходящих в стадии подготовки к извержению, связь между ними, т. е. между предваряющими явлениями и последующими извержениями, а также хорошо знать историю деятельности данного вулкана в прошлом.

Изучением вулканов занимаются различные учреждения и специальные вулканологические обсерватории и станции, одна из главных задач которых предсказать время извержений и выработать мероприятия по охране и защите населения от возможных страшных последствий.

Вулканологические обсерватории и станции существуют в Италии, на Гавайских островах, в Японии и в некоторых других странах.

В Советском Союзе действующие вулканы расположены на Камчатке и Курильских островах в относительно узкой полосе длиной около 2000 км. Одни извергаются часто (Ключевской и Карымский вулканы), другие относительно редко; есть слабо и очень сильно извергающиеся (вулканы Ксудач, Безымянный, Шивелуч).

Изучение деятельности этих вулканов в прошлом и в настоящем проводит специальный Институт вулканологии АН СССР с вулканологическими и сейсмическими станциями. Здесь разрабатываются вопросы прогноза извержений и вулканического районирования, т. е. выявляются и оконтуриваются около действующих вулканов опасные и относительно опасные зоны.

В последние два десятилетия вопрос о предвидении вулканических извержений стал предметом изучения различных наук. Специальные симпозиумы Международной ассоциации вулканологии в 1959 г. в Париже и в 1962 г. в Токио были посвящены исследованиям в области прогноза извержений и мерам защиты от них. В настоящее время накопился большой фактический материал о взаимосвязи явлений, предшествующих извержениям, с самими извержениями. Однако это не значит, что проблема

предсказания извержений решена. Еще много неясного, поэтому необходимо продолжать вести наблюдения.

Весьма важно заранее выявить признаки, которые могут обосновать долгосрочные и краткосрочные прогнозы места, времени и силы извержений.

Основанием для долгосрочного прогноза является история деятельности вулканов за последние тысячелетия (их извержения в среднем с равномерными или неравномерными промежутками времени), а также землетрясения на промежуточных и больших глубинах, связанные с движением магматического вещества.

Краткосрочный прогноз извержений опирается на установление связей изменения физического (сейсмического, магнитного, электрического, гравитационного, теплового) поля вулкана с его деятельностью, а также изменения химического состава фумарольных газов и их температуры.

Местом извержения обычно является кратер вулкана, находящийся большей частью на его вершине, а для боковых извержений — отдельные пункты на его склонах, расположенные на разных расстояниях от главного кратера. На место или, правильнее, на район возможного бокового прорыва указывают довольно точно эпицентры вулканических землетрясений. Примером соответствия эпицентров месту извержений может служить определение эпицентров землетрясений перед первым историческим извержением вулкана Безымянного, который считался потухшим. До его извержения предполагалось, что это эпицентры Ключевского вулкана, находящегося в 10 км к северу от Безымянного. И только, когда начались извержения Безымянного, выяснилось, что эпицентры относились к нему.

О силе извержения свидетельствует анализ предыдущих извержений (их характер, объем извергнутого материала и величина покрытых им площадей), сила предшествующих извержению землетрясений и нарастание условных деформаций и другие данные.

В определении прогноза извержений наметилось три направления, которые можно назвать геологическим, геофизическим и геохимическим.

Геологическое направление заключается в детальном геологическом картировании вулканических областей с обязательным определением возраста вулканических об-

разований радиоуглеродным или другими методами и с выяснением времени и характера извержений в прошлом не только действующих вулканов, но и потухших, второй и, возможно, третьей категорий.

Выявление процессов вулканической активности, происходивших в отдаленное и ближнее время, необходимо для понимания общей тенденции ее развития на долгие периоды. Эти процессы позволяют также предвидеть за несколько дней отдельные сильные взрывы.

Нередко длительное состояние покоя вулкана создает впечатление, будто он является потухшим. Известно немало примеров подобного заблуждения. Так, извержение Везувия в 79 г. произошло по крайней мере после 800-летнего покоя, а об извержениях Ламингтона до 1951 г. вообще не было никаких сведений. Местные жители даже не считали его вулканом.

Периодичность вулканической деятельности характерна и для района Таупо в Новой Зеландии. Геологическими исследованиями здесь было выявлено семь вспышек вулканической деятельности. Абсолютный возраст пяти из них (возраст первой и третьей пока еще не определен) был установлен по древесному углю и остаткам деревьев в пеплах и в лавовых потоках. По данным на 1970 г., вторая вспышка произошла 8870 лет назад, четвертая — 3450, пятая — 2820, шестая — 2280 и седьмая (самая молодая) — 1850 лет назад. Следовательно, последние извержения произошли около 120 г. н. э. Некоторые из них были настолько сильными, что если бы они произошли в наше время, то считались бы катастрофическими. Периоды покоя между первой и второй, а также второй и третьей вспышками пока трудно определить, но предположительно, между второй и третьей, третьей и четвертой периоды покоя были порядка 2000—2500 лет. Между четвертой и пятой вспышками 630 лет, пятой и шестой — 540, шестой и седьмой — 430 лет. После седьмой вспышки вулканы находятся в покое более 1850 лет.

Значит ли это, что они совершенно потухли или снова начнут действовать? Разрешение этого вопроса, т. е. переводить вулканы второй или даже третьей категории в первую или не переводить, является одной из трудных и главных задач вулканологов.

Существует метод первого приближения к проблеме предсказания извержений, заключающийся сначала в

изучении некоторых закономерностей в истории деятельности вулкана на протяжении длительного времени, по крайней мере 15 столетий (проделанного на примере вулкана О-сима К. Накамуры), а затем в выяснении возможности экстраполяции их на будущее время.

Общая тенденция вулканической деятельности вулкана О-сима с первого датированного извержения в 684 г. до наших дней — уменьшение (за немногими исключениями) в три этапа промежутков покоя между извержениями и соответственно постепенное увеличение числа извержений. С 634 до 1552 г. длительность промежуточного покоя была 200, 230, 190, 115 и 130 лет; с 1552 до 1938 г. — 48, 12, 24, 48, 87, 26, 19, 24, 24, 6, 35 и 23 года; с 1938 по 1970 г. — 10, 1, 3 и 2 года.

Переломными годами, как видно, были 1552 и 1938 гг., когда резко сокращались промежутки покоя и соответственно увеличивалось число извержений. По-видимому, частые извержения еще будут происходить некоторое время, а когда исчерпают магматический очаг, прекратятся на более длительный срок.

Предсказать характер начинающегося извержения в отдельных случаях можно по продолжительности промежутков покоя, предшествующих извержениям, и изменениям в течение покоя химического состава лав для каждого вулкана, учитывая и некоторые другие факторы (например, глубину очага). Так, начальный продукт извержения вулкана Гекла находился в линейной зависимости от продолжительности предшествовавшего периода покоя, степень эксплозивности зависела от кислотности магмы. Состав же продуктов вулкана Катла, несмотря на продолжительность предшествовавшего его извержениям покоя, не изменялся, по всей вероятности, потому, что Катла питается более глубоко залегающей базальтовой магмой.

Наиболее надежные и довольно точные данные по предсказанию извержений получают с помощью геофизических, в частности сейсмологических, исследований.

Возникновение трещин у магматического очага, поднятие и движение магмы, подземные взрывы — все это вызывает землетрясения разной силы, которые и предупреждают о приближении извержения. Однако характер этих предварительных сотрясений, а также промежутков между ними и началом извержения сильно варьируют.

Так, перед катастрофическим извержением Везувия в 79 г. землетрясения начались в 63 г. и продолжались с перерывами в течение 16 лет. Прорыву вулкана Парикутина в Мексике в 1943 г. предшествовали только местные землетрясения, продолжавшиеся всего лишь 3 недели. Извержение Геклы в 1947—1948 гг. произошло почти неожиданно. Слабые толчки ощущались за два года и за три-четыре дня до извержения. Однако лишь за 20 мин. до начала извержения они значительно усилились и участились.

Извержению вулкана Косегуина в Никарагуа в 1835 г., по-видимому, одному из самых сильных в Центральной Америке, происшедших в историческое время, предшествовали дрожания только в течение одного дня. Микродрожания за два-четыре месяца наблюдались перед извержениями Асама в Японии, но непосредственно перед извержением не отмечалось содроганий даже у подножия вулкана. За 3 недели до первого, происшедшего в историческое время извержения вулкана Безымянного в 1955 г. наблюдалась целая серия землетрясений.

Перечисленные примеры свидетельствуют о сложности предвидения извержений. По-видимому, такие вариации землетрясений и дрожаний во многом зависят от состояния вулканического канала перед возобновлением извержения, т. е. закрыт он или открыт, от глубины очага, от вязкости поднимающейся магмы и насыщенности ее газами и от ряда других причин.

Обоснованием для прогнозирования вулканических извержений являются процессы, происходящие в магматическом очаге или в вулканическом канале. К таковым относятся тектонические и главным образом вулканические землетрясения, возникающие в результате усиления давления в очаге или в канале и вследствие этого частичного раздробления пород пробки и стенок канала. Чем мощнее и прочнее лавовая пробка в канале, тем сильнее должны происходить землетрясения. Полное раздробление пробки, сопровождаемое обычно многочисленными землетрясениями, очищает и открывает путь началу извержения.

Предваряющие явления, изучить которые можно с помощью геофизических методов, следующие: 1) сильные глубинные или промежуточные землетрясения; 2) изменения частоты землетрясений в вулкане или вблизи него;

3) деформации коры, включающие поднятие, оседание, наклон, расширение и сокращение земной поверхности вблизи вулканов; 4) изменения температуры в кратере или вблизи него в фумаролах; 5) аномальные изменения магнитного, электрического и гравитационного полей на вулкане или вблизи него.

Сопоставление глубинных и промежуточных землетрясений в верхней мантии с вулканическими извержениями на Новых Гебридах, Курилах, Филиппинах, в Японии, Индонезии, Центральной и Южной Америке, а также в Тирренском море показало, что предсказать время извержения можно за несколько месяцев.

Все глубокофокусные землетрясения с магнитудой около 7 предшествовали сильным извержениям, а с магнитудой 5—6,5 — умеренным. Промежуток времени между землетрясением и извержением того или иного вулкана зависит от глубины сейсмического очага — гипоцентра (при землетрясениях на Новых Гебридах глубина гипоцентров была от 120 до 250 км). На скорость подъема магмы влияют ее состав (вязкость) и характер извержения. Она изменяется от 0,5 до 2 км в сутки.

По серии глубоких землетрясений, происходивших между 14 и 19 августа 1959 г. на глубине 55 км, в нескольких километрах к северо-востоку от вершины вулкана Килауэа за 3 месяца (исходя из скорости подъема магмы 0,6 км/сутки) было предсказано его извержение 14 ноября ($55 : 0,6 = 91,66 \approx 92$ дня).

Изучение сейсмических явлений андезитовых вулканов Безымянного и Шевелуча показало, что землетрясения начинаются задолго до извержений вулканов. Так, перед извержением Шевелуча в 1964 г. слабые землетрясения начались за 9,5 месяца. В первые два месяца они происходили редко — всего 10 раз, а затем в течение полумесяца было зафиксировано 37 слабых землетрясений, глубина очагов которых находилась до 10 км. Далее число землетрясений уменьшилось, но происходили они с перерывами в несколько суток. Так продолжалось около 5,5 месяца. Только один раз, примерно за 3,5 месяца до извержения, произошло весьма сильное землетрясение.

За 18 дней до извержения землетрясения происходили ежедневно, по нескольку раз в день. Частота их увеличивалась. В сутки, предшествующие извержению, было отмечено 73 достаточно сильных землетрясения, а в

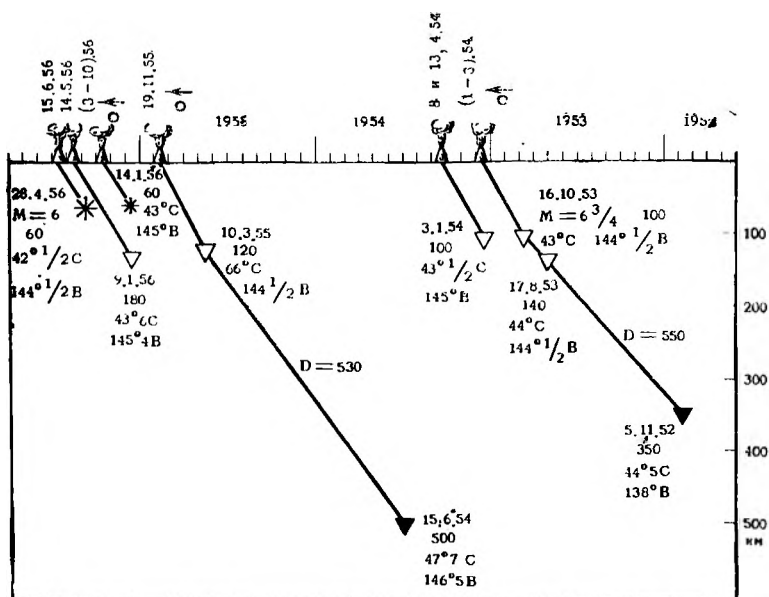


Диаграмма зависимости извержений от силы, глубины и времени мощных землетрясений (по К. Бло)

Д — расстояние от эпицентра землетрясения до вулкана;
М — магнитуда землетрясения

день извержения (12 ноября) произошло 5 очень сильных на фоне сплошных землетрясений, записи которых стали сливаться на сейсмограммах. Подобный ход вулканических землетрясений объясняется постепенным возрастанием давления в канале вулкана и вследствие этого частичным разрушением пород и, может быть, отдельными небольшими их перемещениями. Сильное землетрясение, происшедшее 25 июля, вероятно, связанное с разрушением лавовой пробки в глубоких частях канала, явилось началом прямой подготовки вулкана к извержению. После этого землетрясения магма, по-видимому, внедрялась в верхние части пробки и, создавая непрерывное нарастание давления, разрушала ее сильными землетрясениями, что привело в конце концов к одному из сильнейших извержений. Оно продолжалось всего 70 мин., но за это время было выброшено почти

0,4 км³ пород пробки и стенок канала и около 0,8 км³ горячего обломочного материала, который вылетал со скоростью 1 млн. т в секунду. Энергия всего извержения равнялась примерно $2,5 \cdot 10^{25}$ эрг.

П. И. Токарев, изучая извержения андезитовых вулканов Безымянного в 1955—1961 гг. и Шивелуча в 1964 г., а также прорывы побочных кратеров базальтового вулкана Ключевского, отметил определенную закономерность в извержениях андезитовых вулканов: «Нарастание кривой условных деформаций перед упомянутыми извержениями Безымянного и Шивелуча происходило по гиперболическому закону: $E_h = -a \left(\frac{t_k}{T - t_k} \right)$, где t_k и T выражены в сутках, а за начало отсчета для извержения Шивелуча было принято 25 июля 1964 г.; E_h — условная деформация накопления за время t_k . По данным наблюдений за период с 25 июля по 8 ноября $a = -0,42 \cdot 10^8$ эрг^н, а $T = 107$ суток. Среднеквадратичное отклонение кривой, рассчитанной по формуле, от наблюдаемой кривой в период с 25 июля по 7 ноября равно $\pm 0,5 \cdot 10^8$ эрг^н. Асимптота $E(T)$ приходится на 10 ноября, а извержение произошло 12 ноября, т. е. через двое суток после времени T »¹.

Таким образом, зная закон нарастания условных деформаций и ведя непрерывные наблюдения за сейсмическим режимом андезитовых вулканов, можно заранее предсказать время и энергию извержения.

Примерно в это же время в районе Северной Камчатки происходило усиление глубокофокусных землетрясений на глубинах 70—250 км, что, по-видимому, указывает на связь извержения Шивелуча с движениями в верхней мантии Земли.

Как отмечалось ранее, по наблюдениям за вулканическими землетрясениями возможно предсказать место и время прорывов и побочных кратеров. Т. Минаками установил связь между микроземлетрясениями и извержениями вулкана Асама в Японии и вывел эмпирическую формулу $z = -0,028 + 0,0013x + 0,0031y$, в которой z — вероятность извержения в данном месяце; x — количество микроземлетрясений и дрожаний; y — количество вулка-

¹ П. И. Токарев. Гигантское извержение вулкана Шивелуча 12 ноября 1964 г. и его предвестники. — «Изв. АН СССР», серия «Физика Земли», № 9, 1967.

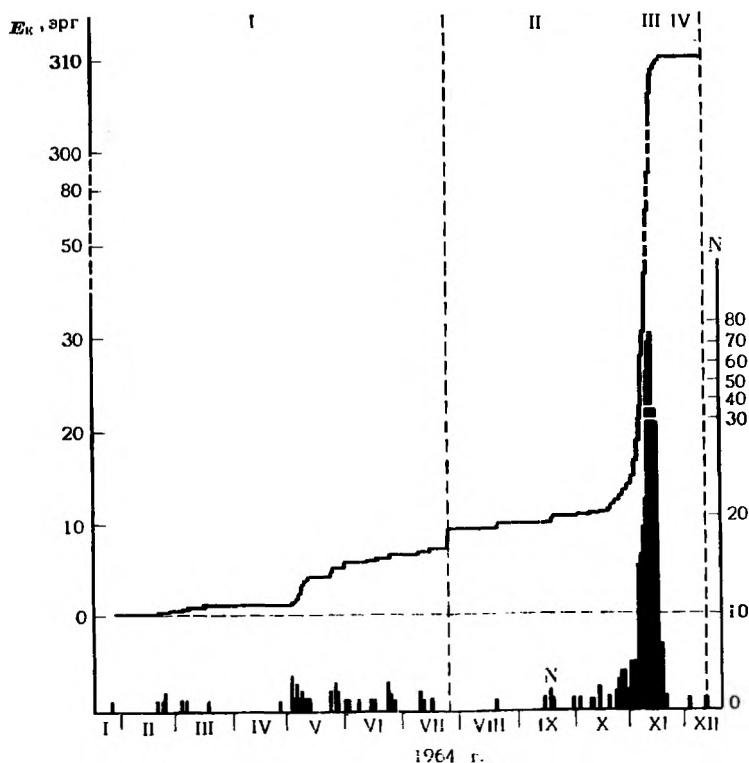


График накопления условных деформаций (E_k) и частоты вулканических землетрясений (N), предварявших и сопровождавших извержение вулкана Шивелуча 12 ноября 1964 г. (K — число землетрясений за сутки энергетического класса $K > 6$). По П. И. Токареву

нических выделений газов в том же месяце. Эту формулу можно использовать для краткосрочных предсказаний.

Появление струй пара и газов на вулкане и почти одновременное возникновение более или менее стабильных землетрясений под вулканами являются признаками возможных грозных извержений. Вспомним, что об извержениях Тамбора до 1815 г. и Ламингтона до 1951 г. не было ничего известно. У Тамбора первые струи пара появились в 1812 г., т. е. за три года до извержения, и начались землетрясения, а у Ламингтона — только за 5 дней.

С возрастанием давления в вулканическом канале связаны и деформации вулканических сооружений, величины которых измеряются сантиметрами, метрами, а в некоторых случаях десятками метров и более. К деформациям, которые могут предшествовать извержениям, относятся колебания почвы, выражающиеся в подъеме или опускании земной поверхности, в расширении или сокращении ее, происходящих в кратере, на склонах и у подножия вулканов.

Ярким примером подъема почвы почти на 60 м является образование купола Сиова-Синзан на вулкане Усу, начавшееся приблизительно за 6 месяцев до извержения.

У некоторых вулканов перед извержением происходит подъем или опускание лавового дна в кратере. У дна кратера вулкана Асама наблюдается явная тенденция подыматься перед извержением, а у вулкана О-сима, наоборот, извержение начинается, когда лавовое дно опустилось.

Многолетние наблюдения при помощи наклонометров на вулканах Асама и Килауэа выявили взаимосвязь между деятельностью вулкана и размерами наклонов пластов и отложений в вулканических сооружениях, причем наклоны значительных размеров наблюдались перед извержением вулкана.

Предвестником извержения может быть расширение или сужение кратера вулкана, определяемое как обычными методами, так и при помощи светового луча или радиоволн, предложенных Р. У. Декером. Электронная аппаратура устанавливается на двух противоположных краях кратера. Если происходит малейшее расширение или сокращение кратера, которое связано с проявлениями вулканической активности, то эти изменения в расстоянии сейчас же отмечаются в аппарате. Измерения размеров кратера Килауэа этим способом показали, что с октября 1964 по март 1965 г., когда произошло извержение, он расширился приблизительно на 12 см, а после извержения его диаметр сократился почти на 27 см.

О предстоящем извержении свидетельствуют изменения значений магнитного поля в вулканических сооружениях и их окрестностях. Уменьшение его интенсивности объясняется увеличением температуры внутри вулкана (до или выше точки Кюри для пород, слагающих его тело) вследствие подъема магмы, а также, возмож-

но, перемещением магматических пород и пьезомагнитным эффектом при повышении давления.

Специальные 10-летние наблюдения взаимоотношений между изменениями угла склонения и вулканическими извержениями на вулкане О-сима (И. Йокояма) показали, что интенсивность магнитного поля в центральной части вулкана уменьшалась за один-два месяца до извержения и восстанавливалась до первоначального значения после начала извержения.

Взаимозависимость изменений температуры в теле вулкана и интенсивности земного магнетизма является надежным фактором для предсказания извержений, особенно базальтов лав, которые по сравнению с более кислыми лавами, содержащими меньшие количества соединений железа, обладают наибольшей интенсивностью магнетизма. К тому же в основном базальтовые лавы маловязкие, благодаря чему легко изливаются без огромных давлений в очаге. В результате взрывы и другие динамические явления, предшествующие извержениям, проявляются слабо, не вызывая сильных сотрясений.

С увеличением давления в вулканическом канале и уменьшением или увеличением в нем температуры вследствие пьезоэлектрического эффекта и изменения электропроводности пород изменяется электрическое поле. Это явление предшествует извержению.

Решая проблему предвидения извержений, следует также учитывать, что перемещение под вулканом определенного количества магмы в вертикальном и горизонтальном направлениях вносит некоторые изменения в гравитационное поле вулкана.

Гравитационные съемки вулкана О-сима, извергавшегося в июле—сентябре 1950 г. и в феврале—марте 1951 г., показали уменьшение силы тяжести. Оно, по-видимому, соответствует уменьшению массы тела сферической формы диаметром 300 м, находящегося на глубине 2 км под вулканом.

Предвестником извержений (правда, не всегда) может служить повышение температуры пород в кратере вулкана, которое объясняется частичным подъемом магмы или увеличением струи высокотемпературных фумарольных газов, выделяющихся как в кратере вулкана, так и на его склонах. Это происходит, по-видимому, в результате увеличения давления в вулканическом канале и повы-

пнения температуры горячих источников. Жители Центральной Америки считают первым признаком предстоящего извержения высыхание растительности в окрестностях вулкана, вызванное повышением температуры его пород.

Однако подъем магмы может произойти столь быстро, что температура пород вулкана не успеет заметно повыситься.

За тепловым состоянием вулканов следят с помощью инфракрасной аппаратуры и составляют термокарты вулканических районов, позволяющие предупредить об извержении вулканов. С этой целью можно применять и спутники Земли, установив на них чувствительные инфракрасные приборы с телеметрической системой передачи их показаний.

Помогают определить извержение и акустические явления. Так, за 10 дней до извержения Везувия в 1906 г. из глубин вулкана почти непрерывно доносились гудящие и жужжащие звуки.

Кроме упомянутых способов предвидения извержений вулканов, предлагается прогнозирование времени сильных извержений, основанное на возможной связи вулканических извержений с 11-летней цикличностью солнечной активности.

Когда солнечная активность большая — число Вольфа (получаемое путем подсчета пятен и их групп на Солнце) больше 60, — сильных извержений не бывает. Они могут происходить, когда число Вольфа небольшое — около нуля.

Наиболее сильные извержения происходят за один-два года до года минимума солнечной активности.

Прогноз извержений по геохимическим данным основывается главным образом на изменениях химического состава вулканических газов и соотношений отдельных газов в фумаролах, в водах термальных источников, связанных с вулканизмом, а иногда даже и в газовом составе воздуха.

По изменениям количественного содержания отдельных компонентов фумарольных газов также можно предполагать об извержении вулкана. Так, в фумарольных газах вулканов Михара и Асама в Японии чем скорее приближалось время извержения, тем в больших количествах выделялись некоторые компоненты фумарольной

Таблица 6

Вулкан	Время сбора	F	Cl	S
		мг/день		
Михара	Апрель — начало июня 1957 г.	0,35—0,55	7,6—16,7	9,0—81,1
	17—30 июля 1957 г.	2,6	56,2	369
	6 августа 1957 г.	Произошло взрывное извержение		
Асама	Июль — сентябрь 1957 г.	—	1,1—5,0	8—22
	Август — октябрь 1958 г.	—	24	615
	10 ноября 1958 г.	Произошло сильное извержение		

газовой смеси. Количества собранных в конденсатах с площадок в 177 см² газов у обоих вулканов приведены в табл. 6.

На основании колебаний отношений Cl/CO₂, SO₂/CO₂, H₂S/SO₂ и величин радиоактивности, если эти изменения происходят в значительных размерах, может быть более или менее удовлетворительно предсказано усиление или ослабление вулканической деятельности.

По увеличению отношения серы к хлору + фтору в фумарольных газах андезитовых вулканов на примере вулкана Безымянного можно предполагать о приближении времени извержения.

Год	Состояние вулкана Безымянного	S/Cl + F	Год	Состояние вулкана Безымянного	S/Cl + F
1962	Извержение	2,3	1965	Покой	0,4
1963	Покой	0,3	1966	Извержение	0,8
1964	Извержение	1,1	1967	»	1,5

Перед извержением Безымянного в 1964 г. отношение S/Cl увеличилось даже в атмосферных осадках. За два месяца до извержения Шевелуча в 1964 г. отношение S/Cl в конденсатах фумарольных газов по сравнению с 1963 г. увеличилось почти в 5 раз.

Из всех фумарольных газов сернистый газ наиболее чувствителен к изменениям температуры и давления. Это обстоятельство может быть также использовано для изучения изменений магматической активности. Однако,

прежде чем делать подобные заключения, необходимо, чтобы все другие факторы, действующие на концентрацию сернистого газа, были проанализированы и исключены. Замечено, что при постоянном давлении содержание сернистого газа увеличивается с ростом температуры; при этом другие компоненты, за исключением паров воды, увеличиваются незначительно.

При постоянной же температуре содержание сернистого газа уменьшается с увеличением давления, а все остальные компоненты остаются практически постоянными.

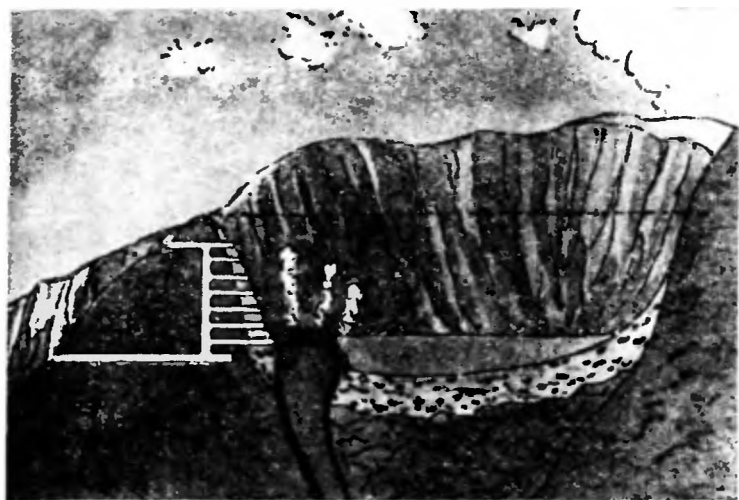
В период вулканической активности изменяется химический состав не только вулканических газов, но и возгонов, а также горячих источников. В водах горячих источников у вулкана Ноборибетсу в Японии постепенно увеличивалось содержание иона хлора, и, когда оно достигло максимума в феврале 1951 г., произошло взрывное извержение. До августа 1953 г. активность вулкана уменьшалась, а с сентября 1953 г. она стала усиливаться, и в горячих источниках стала увеличиваться концентрация иона хлора.

Подобная концентрация иона хлора наблюдалась в термальных водах и перед извержением Эбеко на Курилах в 1963 г. Отношение хлор-иона к сульфат-иону составляло: в 1960 г. — 0,34, в 1961 г. — 0,62, в 1962 г. — 0,70 и в 1963 г. — 0,87.

За две недели до извержения вулкана Аскья в Исландии в 1961 г. начали сильно выделять газы сольфатары и появилась горячая вода. Это явление, по-видимому, связано с начавшимся подъемом из глубин горячих вулканических газов, нагревавших подземные воды.

Выявление поведения радиоактивных изотопов в вулканических процессах, особенностей и закономерностей переноса радиоизотопов вулканическими газами при соответствующих систематических наблюдениях, по всей вероятности, может быть полезным и в предвидении вулканических извержений.

Предлагаются математические методы предсказания времени извержения вулканов, основанные на теории вероятности — сопоставлении продолжительности периодов покоя у вулкана с частотой его извержений. Согласно расчетам, вероятность извержения Геклы определялась в 10% в течение ближайших 30 лет (со времени послед-



Туннели для спуска воды из кратерного озера вулкана Келуд
(из книги Р. Беммелена)

него извержения, происшедшего в 1947—1948 гг.) и около 50% на ближайшие 60 лет.

В действительности же извержение Геклы произошло в 1970 г.

По математическим подсчетам, катастрофические извержения в Курило-Камчатской вулканической полосе происходят один раз в 50—60 лет. На Камчатке они произошли в 1907 г. (Ксудач), в 1956 г. (Безымянный). Однако прошло всего 8 лет, как в 1964 г. было зафиксировано катастрофическое извержение вулкана Шивелуча. Расчетные предсказания хороши тогда, когда учтены все факторы, влияющие на время извержения, но если этого нет, значение подобных предсказаний сводится к минимуму.

Вообще к подобным математическим предсказаниям необходимо относиться пока очень осторожно.

Для предсказания извержения андезитовых и более кислых вулканов, а также прорыва боковых побочных кратеров базальтовых вулканов наиболее надежными являются геофизические и особенно сейсмический методы предсказания времени извержения.

Перечисление вышеуказанных признаков приближающихся извержений не исчерпывает всех явлений, которые могут быть предвестниками. Многие должны дать новые исследования. Чтобы получить хорошие результаты прогноза, места, времени и силы извержения, необходимы учет всех или многих предвестников и внимательный анализ оценок и данных, собранных наблюдениями. Так, время извержения андезитового вулкана Майон в 1968 г. было предсказано по уменьшению значения магнитной интенсивности в окрестностях вулкана, начавшейся за месяц до извержения; по акустическим явлениям — иногда слышавшемуся грохоту; по оползням у вершины вулкана, происходившим в марте и начале апреля 1968 г.; по зареву над кратером и по гармоническому дрожанию, записанному сейсмографами за несколько часов до взрыва.

Следует также учитывать состав извергаемых лав вулканов (основной — базальтовый, средний — андезитовый, кислый — дацитовый или риолитовый) и в связи с этим — их вязкость. В некоторых случаях происходят извержения, характер которых не соответствует данному составу лав. Так, раскаленные тучи (пелейского типа) появляются преимущественно при извержениях андезитовых и более кислых лав. Однако извержения базальтовых вулканов Ламингтона в 1951 г. и Агунга в 1963 г. сопровождалось выбросами очень опасных и губительных раскаленных туч, принесших, как уже упоминалось, много бедствий.

Надо иметь в виду, что не всегда полученные геофизическими и другими методами информация и наблюдения, как будто указывающие на предстоящее вулканическое извержение, подтверждаются.

После извержения в 1957 г. вулкан Заварицкого находился некоторое время в покое. В 1958 г. породы его стали размагничиваться, т. е., казалось, начался новый подъем горячего магматического вещества, который закончится извержением. Однако этого не случилось.

С 1962 г. вулкан Токати находился в покое. В мае 1968 г. на восточном побережье острова Хоккайдо произошло сильное землетрясение с магнитудой 7,9, затем отмечалась серия все усиливающихся вулканических землетрясений. Они продолжались с перерывами почти до марта 1969 г., когда достигли наибольшей силы. Созда-

валось впечатление, что вскоре должно произойти извержение, но вдруг все внезапно прекратилось.

И в первом и во втором случаях энергия поступательного движения магмы, по-видимому, была израсходована на подъем, и ее не хватило на прорыв до самой поверхности Земли.

Интересное явление наблюдалось в Италии. В течение февраля—марта 1970 г. район Поццуоли (вблизи Неаполя) поднялся почти на 90 см. Сильных землетрясений не наблюдалось, а с 1 марта по 10 июля было зарегистрировано 246 очень слабых микроземлетрясений. В середине лета все успокоилось. Извержения не произошло. А его как будто можно было ожидать, так как совсем рядом с одной стороны расположен вулкан Монте-Нуово, а с другой — вулкан Сольфатара, который находится в активной сольфатарной стадии деятельности. Однако отсутствие сильных вулканического типа землетрясений, отчасти устойчивый состав газов в фумаролах Сольфатары, постоянство их температур ($147-149^{\circ}$), какие наблюдались в 1907, 1933 и 1967 гг., свидетельствовали о том, что подъем района Поццуоли не связан с возможным прорывом магмы, а происходил в результате каких-то еще не вполне выясненных процессов и явлений.

Многие исследователи придают большое значение увеличению температур фумарол, считая, что это один из признаков, указывающих на возможность извержения. Тем не менее известны случаи, когда извержениям, например, индонезийских вулканов Мерапи в 1930 г., Слатмет в 1923—1932 гг., Папандияна в 1924—1926 гг. и Анак Кракатау в 1939 г. не предшествовало повышение температуры фумарол.

Сильные землетрясения, связанные или не связанные с вулканическими извержениями, могут вызвать цунами. Они способны принести бедствия не только вблизи мест их возникновения, но и на значительных расстояниях — на отдаленных островах и побережьях материков.

Предвестник возможного цунами — землетрясения под водой или на берегах материков и островов. Во многих случаях более очевидным признаком является отход воды океана от берега на расстояния большие, чем при обычных отливах. Однако необходимо учитывать, что и при сравнительно небольших отливах цунами бывают значительными.

Говоря о прогнозе вулканических извержений, следует отметить, что этой проблемой заинтересовались, особенно в последние два десятилетия, многие науки, пытаясь ее решить своим, свойственным каждой из них, методом.

В настоящее время вопрос прогнозирования может быть более или менее успешно решен только в результате всесторонних комплексных наблюдений за состоянием вулканов.

Пассивная защита

Защита людей и народного хозяйства от губительных последствий катастрофических извержений может быть пассивной и активной. Пассивная заключается в проведении вулканического районирования (отчасти подобного сейсмическому районированию), чтобы принять меры по охране жизни людей и уменьшить бедствия, приносимые извержениями, а также в предсказании места и времени начала извержения.

Главная задача вулканического районирования — выявить и определить опасные для жизни людей и народного хозяйства зоны, ознакомить с ними население и дать рекомендации соответствующим учреждениям, ведающим размещением населенных пунктов и строительством.

Вулканическое районирование должно основываться на анализе следующих данных.

1. Вулкан должен относиться к категории действующих или, по тем или иным признакам, сомнительных.

В настоящее время принято считать вулкан действующим: 1) если он извергался в настоящее время; 2) если известны, по литературным данным и историческим документам, даты извержений в недалеком прошлом; 3) по народным преданиям, говорящим об извержениях; 4) если он находится в сольфатарной стадии деятельности. Сомнительный (потухший) вулкан определяется: 1) по сейсмическим данным; 2) возможно, по магнитным и гравитационным данным. Если он является очень молодым: а) по абсолютному возрасту (радиоуглеродным методом); б) по археологическим данным; в) по морфологическим данным.

II. Состояние вулкана в настоящее время: 1) действует; 2) в фумарольной стадии; 3) в сольфатарной стадии; 4) в мофетной стадии; 5) наличие только горячих источников; 6) без видимых газовых и термальных явлений.

III. Строение вулкана и состав слагающих его горных пород. Эти сведения весьма важны для выяснения характера происходивших вулканических процессов и их роли в формировании данного вулкана. По ним можно судить о свойствах лав и типах извержений, преобладавших в период образования данного вулкана.

IV. Характер деятельности вулкана в прошлом: 1) характер вулканических образований (лавовые покровы и потоки, туфы, отложения пирокластических потоков, раскаленных туч, горячих лавин и грязевых потоков); 2) типы извержений; 3) периодичность или непериодичность извержений.

V. Геофизические данные (сейсмические, магнитометрические и др.). Сведения об изменениях в пространстве и во времени мест гипоцентров землетрясений и об их силе, магнитности и др.

VI. Рельеф вулкана и его окрестностей. Тщательное изучение рельефа местности: наличие барранкосов, ложбин, долин, холмов, гряд и т. п. Одни из них локализируют движение по ним лавовых или грязевых потоков, другие, например холмы и гряды, расположенные на склонах и у подножия вулкана, изменяют направление течения и задерживают движение потоков.

VII. Климатические условия. Сведения о сезонности, силе и продолжительности дождей, о снегопадах и мощности снегового покрова, о преобладающем направлении и силе ветра.

На основании всех этих данных на карте выделяются и оконтуриваются опасные и относительно опасные зоны. Желательно также указать возможные пути движения лавовых и грязевых потоков, раскаленных туч и горячих лавин, если такие отмечались при более ранних извержениях. Если в опасных и относительно опасных зонах существуют населенные пункты, надо зафиксировать на карте и пути эвакуации их жителей.

Необходимо также указать на некоторые средства защиты от губительных последствий цунами.

Вслед за сильным землетрясением или извержением

специальные цунами-станции извещают население сигналами и по радио о возможном цунами и о возможном времени его прихода. Кроме того, наблюдают за уровнем океана и величиной отлива воды от берега.

Активная защита

Активная защита особенно необходима в тех местах, где уже существуют города, крупные селения или какие-либо жизненно важные сооружения, как, например, водохранилища на некоторых островах, снабжающие население питьевой водой.

К главным мерам активной защиты относятся следующие:

1. Бомбардировка авиацией, артиллерией или ракетами стен кратеров, бортов лавовых потоков и долин или ложбинок.

2. Создание дамб и других искусственных сооружений.

3. Проведение туннелей к кратеру для спуска накапливающейся в нем воды.

Могут быть предложены и другие меры. Конечно, в каждом конкретном случае необходимо решать, какие меры защиты лучше всего принять в данный момент.

Бомбардировку авиацией, тяжелой артиллерией или ракетами можно применять только для того, чтобы изменить направление течения лавы любого типа.

В других случаях этот метод может быть применен только тогда, когда лава потечет по определенной долинке или ложбинке. При подходящем рельефе склона вулкана бомбардировкой можно проложить путь для лавы в соседнюю ложбину.

Создаваемые самими лавовыми потоками поперечные барьеры, которые изменяют и направляют течение лавы на жизненно важные объекты, можно разрушить бомбардировкой.

Затруднения в применении этого метода — плохая погода, плохая видимость, наблюдающаяся во время многих извержений, — сильно мешают произвести крайне необходимую точную бомбардировку. По мнению Г. Макдональда, бомбы смогут попадать точно в цель даже при плотных облаках и вообще плохой видимости, если применять инфракрасные или радарные прицелы.

Другая трудность — иногда короткий промежуток времени — может быть ликвидирован только быстрой оперативностью. Это относится к бомбардировке быстро движущихся потоков. Так, лавовый поток, разрушивший часть деревни на склоне Мауна-Лоа 1 июня 1950 г., не мог быть отклонен бомбардировкой, ибо поток достиг деревни через 3 часа после начала извержения.

Защищаться от очень жидких лав, изливающихся по относительно пологому склону, можно путем создания каменных стен и других искусственных барьеров, сложенных даже из песка, глыб различных горных пород, а также почвы и всякого мусора.

Известен ряд примеров, когда лавовые потоки, достигая каменных стен, не разрушали их или частично разрушали в тех местах, где поток двигался под прямым углом к стене. Так было во время извержения Этны в 1669 г. Каменные дома не разрушались, когда лавовые потоки продвигались вдоль улиц, но те дома, которые были расположены под прямым углом к движению потока, разрушились.

Каменные стены и даже нескрепленные каменные валы — ограды — способны противостоять давлению маловязких лавовых потоков и отклонять их в сторону.

Искусственные барьеры — валы, насыпи — в подходящих топографических условиях можно довольно легко и быстро создать с помощью бульдозеров. Причем, высота насыпи не должна превышать мощность потока, так как цель ее — только отклонить поток от площади, которую желательно защитить. Главное же требование к насыпи заключается в том, чтобы она была построена по возможности под острым углом к течению потока и чтобы был постоянный скат (уклон) и открытый путь шириной не менее сотни метров.

Чтобы целесообразно расположить защитные барьеры, всегда необходимо учитывать рельеф местности и характер движущегося лавового потока. В некоторых случаях барьеры следует расположить не сплошным валом, а уступами.

Так, чтобы отклонить широкий язык лавового потока (ответвление от главного лавового потока) во время извержения Килауэа в 1955 г., был создан в течение четырех часов при помощи шести бульдозеров вал длиной около 300 м и высотой в среднем около 3 м.

Вулканы, в кратерах которых между извержениями накапливаются десятки миллионов кубических метров воды, весьма опасны образованием мощных грязевых потоков. Чтобы воспрепятствовать этому и, следовательно, защититься от их губительных воздействий, нужно не давать воде накапливаться в кратере. Необходимо ее дренировать. С этой целью в Индонезии на вулкане Келуд выстроено семь горизонтальных туннелей от кратера до проделанной шахты. Самый верхний туннель идет через вершину шахты к наружному склону вулкана. Остальные туннели проведены только до шахты. В этой системе есть еще один горизонтальный туннель от самой нижней части шахты до склона вулкана.

Таким образом, по мере накопления воды в кратерном озере она должна постепенно стекать по туннелям и шахте на склон вулкана.

При проектировании и строительстве подобной системы туннелей необходимо тщательно выяснить строение стенок кратера, наличие или отсутствие разломов и трещиноватости, проницаемость или непроницаемость пород, слагающих стены кратера.

При выборе мест для туннелей важно учитывать возможный характер извержений. Излияние или выжимание лавы может закупорить туннель и, таким образом, воспрепятствовать стоку воды, а взрывы способны частично понизить дно кратера и создать выемку для более глубокого кратерного озера, расположенного значительно ниже, чем самый нижний туннель.

Существуют и другие проекты, например выливать по сифонным трубам из кратера первые порции воды, которые затем будут изливаться самотеком.

Чтобы предотвратить гибельные воздействия цунами, строительство сооружений должно осуществляться в более высоких местах — выше 20 м горизонтали нежилые здания следует создавать особой конструкции, чтобы они могли выдержать удары волн как со стороны океана, так и со стороны суши при обратном их отходе. На самом берегу необходимо возводить полосы леса шириной в несколько сотен метров.

Жители, живущие ниже 20 м горизонтали, в случае цунами обязаны немедленно уйти в более высокие места и не возвращаться в течение двух часов, так как приход цунами не ограничивается одной волной.

При угрозе цунами все суда, находящиеся в непосредственной близости к берегу, должны отойти в океан за 50-метровую изобату.

О мероприятиях, связанных непосредственно с защитой населения

На упоминавшемся симпозиуме в Париже Б. Жезом были предложены «Примерные правила защиты от вулканических извержений». Они учитывают, во-первых, последовательность изменений характера извержения, зависящих от эволюции вулканической активности данного вулкана, и, во-вторых, обязанности вулканологической службы и административных властей, в чье ведение входят территории, подвергающиеся опасности в случае извержения.

Функции вулканологической службы и административных властей разделяются. Первая в случае предстоящего извержения занимается в начальную стадию наблюдениями и всесторонним изучением вулкана и его окрестностей с помощью разнообразных геофизических и химических аппаратов на постоянной центральной и временных подвижных вулканологических станциях; проводит демаркационные линии опасных зон, определяет наиболее удобные маршруты эвакуации, разрабатывает план проведения работ по активной защите.

Административная власть в это время устанавливает сигнал тревоги и вместе с вулканологической службой готовит план эвакуации; производит защитные и предупредительные меры, предложенные вулканологической службой. Такая предварительная стадия подготовки к принятию мер по защите населения весьма важна, потому что и пассивная, и активная защита не могут быть осуществлены без полного познания «врага», его привычек и ритма извержений. В таких случаях административная власть является «командующим фронтом», а вулканологическая служба — его «тайной разведкой». Поэтому задолго до непосредственной опасности вулканологи и административная власть должны работать в тесной связи и об этом нужно извещать местное население.

В стадии тревоги вулканологическая служба предупреждает административную власть о возможности извержения, предполагаемом его характере и указывает на-

правление, по которому опасность является наиболее вероятной, увеличивает количество инструментальных наблюдений и устанавливает новые подвижные станции, постоянно находится в контакте с административной властью.

В этот период административная власть мобилизует полицию, милицию, армию, санитарную службу и отряды гражданской защиты; немедленно реквизирует и привлекает все средства активной защиты (для вулканов гавайского типа — бульдозеры, пущки, ракеты, самолеты для бомбардировки и т. п.) в тех случаях, когда будет решено их применение полезным; извещает население о готовности к возможной и немедленной эвакуации и о ее маршрутах; мобилизует все общественные и частные средства сообщения; устанавливает связь с дорогами и районами, куда будут направляться эвакуируемые.

Стадия тревоги — очень ответственная стадия с психологической и финансовой сторон, так как эвакуация часто может вызвать огромные расходы и нарушить ритм работы многих людей и учреждений. Как уже говорилось, предвещающие признаки еще не означают, что извержение произойдет. В подобных случаях руководители вулканической службы и административной власти могут колебаться, отдавать ли распоряжение об эвакуации. Однако очень опасно откладывать это до последнего момента. Чтобы избежать паники среди населения, важно заранее объяснить все мероприятия по защите населения. По времени стадия тревоги может быть различной — как относительно долговременной, так и очень короткой.

В стадии эвакуации вулканологическая служба сообщает административной власти о неизбежности извержения и, насколько возможно, о его характере. Если вулканологические станции расположены в опасных зонах, то отдается распоряжение об их немедленной эвакуации или переходе в убежища. Вулканологическая служба, где бы она ни находилась — на станции, в убежище или в эвакуации, — должна постоянно вести наблюдения за вулканом и поддерживать постоянную связь с административной властью.

Административная власть обязана дать приказ об эвакуации и немедленно начать ее, согласно принятым маршрутам, в ряде опасных зон, установленных вулканологической службой.

Полиция, милиция, армия и санитарная служба проводят эвакуацию и контролируют ее выполнение. Должны быть также небольшие количества наблюдательных постов.

В стадии обслуживания и контроля извержения вулканологическая служба ведет наблюдения за всеми явлениями и процессами, происходящими во время извержения, чтобы лучше познать динамизм вулкана и учесть его при возможных извержениях в будущем; дает советы об активной защите, по важным вопросам эвакуации (приостановить или производить дополнительную эвакуацию из повых районов); находится в постоянной связи с административной службой.

Административная служба приводит в исполнение мероприятия по активной защите по совету вулканологической службы; наблюдает за эвакуированным населением, пока не пройдет опасность; занимается распределением пищи и охраной здоровья эвакуированного населения; поддерживает моральное состояние граждан точными объяснениями происходящего в местности, откуда они эвакуировались.

Если сила извержения будет превосходить все предвиденное, то, по-видимому, должны быть проведены дополнительные мероприятия.

В стадию конца тревоги и возвращения вулкана к покою вулканологическая служба извещает административную власть о вероятном конце извержения на основании следующих признаков: сокращается число вулканических землетрясений, изменяется состав фумарольных газов и уменьшается их температура, постепенно прекращаются акустические звуки и другие явления, уменьшаются сильные концентрации газов, способных вызвать отравление.

Прежде чем вернуть скот, следует проверить, нет ли на лугах и пастбищах вредных материалов — волос Пеле и вулканического остроугольного песка.

Если опасность возникновения извержения еще остается, то лучше посоветовать возвратиться только малой части населения (например, для срочных сельскохозяйственных работ), когда же конец опасности станет очевидным, дать совет о возвращении всех граждан в свои жилища.

С окончанием тревоги административная служба, руководствуясь советами вулканологической и санитарной служб, возвращает всех жителей сразу или (в зависимости от количества людей) в несколько приемов, чтобы не создавать транспортных трудностей. Предварительно, очевидно, санитарная служба выяснит вопрос о возможной эпидемии.

Возвращение к покою и конец тревоги представляют много трудностей, особенно если извержения не произошло или оно состоит в чередовании периодов деятельности и покоя. В таких случаях вулканологической службе крайне трудно распознать конец опасности. Если будет принят временный покой за окончание извержения и если жители возвратятся слишком рано, то конец может быть катастрофическим. Но если возвращение задержится на слишком долгое время, это может вызвать общее недовольство среди эвакуированного населения. Вот почему, кроме наблюдений, производимых в настоящее время вулканическими службами, необходимо познание характера, привычек и повадок каждого вулкана в прошлом.

- А. И. Абдурахманов и др.** Возможная связь вулканических извержений с цикличностью солнечной активности.—Тезисы доклада XV Генер. ассам. МАВХНЗ». М., ВИНТИ, 1971.
- В. В. Аверьев.** Гидротермальный процесс в вулканических областях и его связь с магматической деятельностью.—Сб. «Современный вулканизм». М., «Наука», 1966.
- В. Н. Аверьянова и др.** Вопросы глубинного строения и развития Курильской зоны современного вулканизма.—Сб. «Вулканизм и глубинное строение Земли». М., «Наука», 1966.
- И. В. Белов.** Основной магматический процесс в свете кристаллохимии.—Сб. «Химия земной коры», т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1963.
- В. В. Белоусов.** Земная кора и верхняя мантия материков. М., «Наука», 1966.
- В. В. Белоусов.** О возможных глубинных условиях магматизма.—Сов. геол., 1966, № 4.
- Р. В. ван Беммелен.** Геология Индонезии. М., ИЛ, 1957.
- А. П. Виноградов.** Химическая эволюция Земли. М., Изд-во АН СССР, 1959.
- А. П. Виноградов.** О происхождении вещества земной коры.—Геохимия, 1961, № 1.
- В. И. Вьюдаев.** Пассивная и активная защита при катастрофических извержениях вулканов.—Бюлл. вулк. станции, 1959, № 28.
- Г. С. Горшков и Г. Е. Богоявленская.** Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения (1955—1963). М., «Наука», 1965.
- Г. С. Горшков и Ю. М. Дубик.** Направленный взрыв на вулкане Шевелуч.—Сб. «Вулканы и извержения». М., «Наука», 1969.
- Д. Х. Грин, А. Э. Рингвуд и др.** Петрология верхней мантии. М., «Мир», 1968.
- И. И. Гущенко.** Пеплы Северной Камчатки и условия их образования. М., «Наука», 1965.
- В. А. Ермаков.** Ключевская группа вулканов (автореферат). Петропавловск-Камчатский, 1970.
- К. К. Зеленев.** Подводный вулканизм и его геологическое значение.—«Труды Лаб. вулк.», 1967, № 24.
- В. С. Коптев-Дворников и А. Д. Ракчеев.** О возможных причинах глубинного магнообразования. Баку, Изд-во АН Азерб. ССР, 1969.
- Е. Н. Люстях.** О роли вулканов и терм в выносе тепла из недр Земли.—«Труды I Всесоюзн. совещ. по геотерм. иссл.», т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1959.
- Е. А. Любимова.** Термика Земли и Луны. М., «Наука», 1968.
- В. А. Магницкий.** Внутреннее строение и физика Земли. М., «Недра», 1965.
- Е. К. Мархинин.** Об энергии образования ювенильного вулканического пепла.—«Докл. АН СССР», 1957, 116, 5.
- И. А. Меньялов.** Дифференциация летучих компонентов магмы в про-

- T. Simkin, K. T. Howard.** The 1968 collapse of Fernandina caldera, Galapagos Islands.— *Smithsonian Inst. Centre for Short-lived phenomena*, 1968.
- H. Tazieff.** New investigation on eruptive gases.— *Bull. Volcano.*, XXXIV, fasc. 2, 1971.
- S. Thorarinsson.** On the predicting of volcanic eruption in Iceland.— *Bull. Volcanol.*, XXIII, 1960.
- S. Thorarinsson.** Surtsey the new island in the North Atlantic. Reykjavik, Almenna Bókafélagid, 1966.
- S. Thorarinsson.** The Lakagigar eruption of 1783.— *Bull. Volcanol.*, XXXIII, fasc. 3, 1970.
- P. J. Wyllie.** Water's influence.— *Sci. News*, v. 98, N 2, p. 38, 1970.
- I. Yokoyama.** Energetics in active volcanoes. 1st Paper.— *Bull. Earthquake Res. Inst.*, XXXIV, Pt. 2, 1956.
- I. Yokoyama.** Energetics in active volcanoes. 2nd Paper, 3-rd Paper.— *Bull. Earthquake Res. Inst.*, XXXV, Pt. I, 1957.
- I. Yokoyama.** Pozzuoli Event in 1970.— *Nature*, v. 229, 1971.
- I. Yokoyama.** Precautionary geophysical observations against volcanic eruptions.— *Abstr. Sympos. on XV Gen. Assem. IAVCEI, Moscow*, 1971.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Катастрофические извержения вулканов . . .	5
Виновники бедствий — вулканы	27
Предвидение и защита	132
Литература	165

Владимир Иванович Влодавец

Вулканы Земли

**Утверждено к печати редколлегией серии
научно-популярных изданий Академии наук СССР**

Редактор Л. И. Прихолько

Художественный редактор В. Н. Тякунов

Технический редактор И. А. Макогонова

Сдано в набор 2/II 1973 г.

Подписано к печати 20/IV 1973 г.

Формат 84×108¹/₁₆. Бумага № 2

Усл. печ. л. 8,82+4 вкл. (0,21). Уч.-изд. л. 9,4

Тираж 40 000. Т-04841. Тип. зак. 1589

Цена 63 коп.

Издательство «Наука», 103717 ГСП,

Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография издательства «Наука», 121099,

Москва, Г-99, Шубинский пер., 10